

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Institut dopravy**

# **Optimalizace vedení linek**

## **MHD**

**Disertační práce**

<b>Studijní program:</b>	<b>P2301 Strojní inženýrství</b>
<b>Studijní obor:</b>	<b>2301V003-00 Dopravní technika a technologie</b>
<b>Školitel:</b>	<b>doc. Ing. Ľudmila Jánošíková, CSc.</b>
<b>Doktorand:</b>	<b>Ing. Martin Blatoň</b>

**Ostrava 2011**

## ANOTACE

BLATONĚ, M.: Optimalizace vedení linek městské hromadné dopravy.

Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011, 105 stran, Disertační práce, školitel: JÁNOŠÍKOVÁ, L.

Disertační práce na téma Optimalizace vedení linek městské hromadné dopravy se zabývá problematikou návrhu sítě linek metodami matematického programování.

Úvodní kapitoly disertační práce jsou věnovány základnímu rozboru kritérií kvality v městské hromadné dopravě - doba a rychlost přemístění, bezpečnost dopravy, přepravní příležitost, spolehlivost a přesnost, komfort, informovanost, vlivy na životní prostředí, ekonomické náklady. Následně jsou kritéria rozdělena na dvě základní skupiny – se vztahem k síti linek a ostatní. Každé kritérium je detailně popsáno. Dále se zabývají přehledem přístupů k navrhování sítě linek MHD. V závěru analytické části práce jsou definovány cíle disertační práce.

Návrhová část práce je shrnuta do dvou kapitol. První kapitola popisuje teoretická východiska řešení. V druhé kapitole je popsána formulace problému, návrhy matematických modelů a návrh nového algoritmu pro řešení úlohy. Součástí těchto kapitol je i popis modelování chování cestujících. Chování cestujících se prognózuje podle navržené sítě linek.

Další část práce je věnována experimentům s navrženými modely a algoritmy. Experimenty jsou prováděny v síti linek městské hromadné dopravy v městě Žilina.

V závěrečných kapitolách jsou shrnuty vědecké přínosy práce a možnosti pokračování v řešení daného problému.

Výsledkem práce je nový vícefázový přístup navrhování sítě linek městské hromadné dopravy. Navržený přístup využívá především exaktních modelů. Jsou navrženy jako modely lineární a vícekritériální. Řešení navržených modelů probíhalo optimalizačním softwaru Xpress-IVE. Navržené modely jsou dále doplněny heuristickým algoritmem. Navržené modely i algoritmus byly publikovány na domácích i mezinárodních konferencích.

## ANNOTATION

BLATONĚ, M.: Optimisation of the routes of urban public transport lines.

Ostrava: Institute of Transport, Mechanical Faculty, Technical University Ostrava, 2010, 105 pages, dissertation thesis, adviser: JÁNOŠÍKOVÁ, L.

Dissertation thesis is „The ways“ deals with the problem of designing urban line network using mathematical programming methods.

The introductory chapters of the dissertation thesis are devoted to the main analysis of the quality criteria in urban mass transport – time and speed of transportation, transportation safety, opportunity, reliability and accuracy, comfort, informedness, environmental impact, economic cost.

Consequently, the criteria are divided into two basic groups – in relation to transport line network and the others. Each criterion is described in detail. Furthermore, the survey of the approaches to the urban line network design is presented. There are defined the aims of the dissertation thesis at the close of the analysis part.

The design part is summarized into two chapters. The first chapter describes theoretical background. The second chapter describes, the problem formulation, the mathematical models proposal, and the proposal of a new solution methodology. The part of these chapters is the description of modelling passengers' behaviour. The passengers' behaviour is estimated according to the proposed transport line network.

The next part is devoted to experiments with the proposed models and algorithms. The experiments are performed at the urban line network in Žilina.

In concluding chapters there are summarized scientific benefits of the thesis and possibilities of further research in a given problem.

The thesis result is a new multiphase method of designing the urban public transport line network.

The proposed method is based on the exact models. They are designed as linear and multi-criteria models. The designed models were solved using optimisation software Xpress-IVE. The proposed models are combined with a heuristic algorithm and were published at native and international conferences.

## ANNOTATION

BLATOŇ, M.: Verkehrsnetzoptimierung im städtischen Massenverkehr und befasst sich mit Verkehrsnetzproblematik durch mathematische Programmierung.

Dissertationsthema heisst Verkehrsnetzoptimierung im städtischen Massenverkehr und befasst sich mit Verkehrsnetzproblematik durch mathematische Programmierung.

Die Leitkapitel dieser Arbeit sind der Hauptkriterienanalyse im städtischen Massenverkehr gewidmet – Dauer und Geschwindigkeit der Transferierung, Transportgelegenheit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Verkehrs, Komfort, Informiertheit, Auswirkungen auf die Umwelt, Wirtschaftskosten. Die Kriterien sind weiter in zwei Hauptgruppen eingeteilt – die mit einer Beziehung zum Verkehrsliniennetz und die andere.

Jedes Kriterium wird im Detail beschrieben. Weiter befassen sie sich mit einem Zugangsübersicht zur Projektierung der Massenverkehrslinien. Im Abschluss des analytischen Teils der Arbeit sind Ziele der Dissertationsarbeit definiert.

Der Entwurfsteil der Arbeit ist in zwei Kapitel zusammengefasst. Erste Kapitel beschreibt die theoretische Lösungen. Die zweite Kapitel beschreibt eine Problemformulierung, Entwürfe der mathematischen Modelle und Entwürfe des neuen Algorithmus für eine Problemlösung.

Ein Bestandteil dieser Kapitel ist auch Beschreibung der Modellierung von der Passagierenverhaltung. Die Verhaltung der Fahrgäste vorhersagt man nach dem vorgeschlagenen Verkehrsliniennetz.

Nächster Teil der Arbeit befasst sich mit den Versuchen, die die vorgeschlagene Modelle und Algorithmen betreffen. Die Versuche werden im Verkehrsliniennetz der Stadt Žilina durchgeführt.

Die Schlusskapitel fassen einen wissenschaftlichen Beitrag und Fortsetzungsmöglichkeit in der Problemlösung zusammen.

Das Arbeitsergebnis ist ein Mehrphasenzugang zur Verkehrsliniennetzprojektierung. Der vorgeschlagene Zugang nützt vor allem exakte Modelle. Die sind als lineare und multikriterielle Modelle konzipiert. Die Lösung dieser Modelle lief durch eine Optimierungssoftware Xpress-IVE. Vorgeschlagene Modelle sind weiter um einen heuristischen Algorithmus ergänzt. Die Modelle und Algorithmen wurden auf den Inlands- und Auslandskonferenzen veröffentlicht.

## **OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE**

<b>OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>5</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>9</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>13</b>
<b>3. KRITÉRIA POSUZOVÁNÍ NAVRŽENÉHO SYSTÉMU MHD .....</b>	<b>14</b>
3.1 Obecná kritéria hodnocení systému linek MHD .....	15
3.2 Kritéria se vztahem k trasám a frekvencím linek .....	21
3.2.1 Kritéria hodnocení z pohledu cestujících .....	22
3.2.2 Kritéria hodnocení z pohledu dopravce.....	22
<b>4. GENEZE ŘEŠENÍ PROBLÉMU NÁVRHU SÍTĚ LINEK MHD .....</b>	<b>23</b>
4.1 Heuristické metody.....	23
4.2 Exaktní metody.....	28
<b>5. TEORETICKÁ VÝCHODISKA ŘEŠENÍ.....</b>	<b>36</b>
5.1 Princip vícekritériální optimalizace na bázi metody STEM.....	36
5.2 Matematické modelování diskrétního výběru .....	39
5.2.1 Teorie užitku.....	40
5.2.2 Multinomial Logit Model .....	43
<b>6. NÁVRH ŘEŠENÍ PROBLÉMU OPTIMALIZACE SÍTĚ LINEK MHD .....</b>	<b>44</b>
6.1 Stručná charakteristika navrženého postupu .....	44
6.2 Návrh multikritériálního matematického modelu pro nalezení výchozího řešení.....	44
6.3 Nový algoritmus pro návrh sítě linek MHD .....	49
6.3.1 Metoda pro přidělení cestujících na úseky sítě linek.....	52
<b>7. VÝPOČETNÍ EXPERIMENTY .....</b>	<b>54</b>

7.1 Vstupní parametry pro výpočetní experimenty .....	55
7.1.1 Údaje o síti linek.....	55
7.1.2 Údaje o přepravních požadavcích .....	58
7.1.3 Údaje o vozidlovém parku.....	59
7.2 Příprava vstupních dat pro výpočetní experimenty .....	60
7.3 Experimenty.....	65
7.3.1 Dosažené výsledky pro ranní špičku od 6:00 do 8:00 .....	68
7.3.2 Dosažené výsledky pro ranní přepravní sedlo od 8:00 do 14:00.....	70
7.3.3 Dosažené výsledky pro odpolední špičku od 14:00 do 17:00 .....	71
7.3.4 Dosažené výsledky pro víkendový den od 4:00 do 23:00 .....	72
7.5 Analýza průběhu výpočetních experimentů .....	81
7.6 Ekonomické aspekty změn ve vedení linek MHD .....	85
<b>9. MOŽNOSTI POKRAČOVÁNÍ V ŘEŠENÍ UVEDENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>95</b>
<b>10. ZÁVĚR.....</b>	<b>96</b>
<b>11. SEZNAM POUŽITÉ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURY .....</b>	<b>97</b>
<b>12. PŘEHLED PUBLIKACÍ DOKTORANDA .....</b>	<b>100</b>
Seznam vlastních článků publikovaných k tématu disertační práce.....	100
Seznam ostatních publikačních aktivit .....	100
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>102</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obrázek č. 1</b>	Vývojový diagram.....	<b>51</b>
<b>Obrázek č. 2</b>	Průběh exponenciální funkce pro různé parametry $\mu$ .....	<b>53</b>
<b>Obrázek č. 3</b>	Letecký pohled na město Žilina .....	<b>54</b>
<b>Obrázek č. 4</b>	Síť linek MHD Žilina .....	<b>56</b>
<b>Obrázek č. 5</b>	Pracovní prostředí software MEFA. 06 .....	<b>63</b>

## SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka č. 1</b>	Přehled linek zařazených do širší množiny linek, způsob jejich přečíslování a základní informace pro potřeby matematického modelu .....	<b>58</b>
<b>Tabulka č. 2</b>	Typy autobusů, jejich kapacita a emisní úrovně .....	<b>59</b>
<b>Tabulka č. 3</b>	Typy trolejbusů a jejich kapacita .....	<b>60</b>
<b>Tabulka č. 4</b>	Vypočtené emise autobusů pro jednotlivé podélné sklony .....	<b>64</b>
<b>Tabulka č. 5</b>	Průměrná rychlost na lince .....	<b>65</b>
<b>Tabulka č. 6</b>	Výsledky pro ranní přepravní špičku .....	<b>68</b>
<b>Tabulka č. 7</b>	Výsledky pro ranní přepravní sedlo .....	<b>70</b>
<b>Tabulka č. 8</b>	Výsledky pro odpolední přepravní špičku .....	<b>71</b>
<b>Tabulka č. 9</b>	Výsledky pro víkendový den .....	<b>72</b>
<b>Tabulka č. 10</b>	Přehled frekvencí za období ranní přepravní špičky v rozmezí 6 – 8 h.....	<b>75</b>
<b>Tabulka č. 11</b>	Přehled frekvencí za období ranního přepravního sedla 8 – 14 h.....	<b>77</b>
<b>Tabulka č. 12</b>	Přehled frekvencí za období odpolední přepravní špičky 14 – 17 h.....	<b>78</b>
<b>Tabulka č. 13</b>	Přehled frekvencí za období víkendového dne v rozmezí 4 – 23 h .....	<b>79</b>
<b>Tabulka č. 14</b>	Proces konvergence navrženého algoritmu pro období ranní přepravní špičky 6 – 8 h .....	<b>82</b>
<b>Tabulka č. 15</b>	Proces konvergence navrženého algoritmu pro období ranního přepravního sedla 8 – 14 h .....	<b>83</b>

<b>Tabulka č. 16</b>	Proces konvergence navrženého algoritmu pro období odpolední přepravní špičky 14 – 17 h .....	<b>84</b>
<b>Tabulka č. 17</b>	Proces konvergence navrženého algoritmu pro období víkendového dne 4 – 23 h.....	<b>84</b>
<b>Tabulka č. 18</b>	Výše provozních nákladů na 1 km při zohlednění různých rozsahů nákladových položek.....	<b>89</b>
<b>Tabulka č. 19</b>	Výpočet celkového dopravního výkonu pro pracovní den březen 2010....	<b>89</b>
<b>Tabulka č. 20</b>	Výpočet celkového dopravního výkonu pro víkendový den v březnu 2010 .....	<b>90</b>
<b>Tabulka č. 21</b>	Celkový dopravní výkon za březen roku 2010 .....	<b>90</b>
<b>Tabulka č. 22</b>	Úspora finančních prostředků z uspořeného dopravního výkonu v navrhovaném řešení za měsíc březen 2010 .....	<b>91</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CNG	stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas)
CO	oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
DP	dopravní prostředek
DPMŽ	dopravný podnik města Žiliny
EURO	emisní norma
HC	nespálené uhlovodíky
LPG	zkapalněný ropný plyn (Liquefied Petroleum Gas)
MHD	městská hromadná doprava
NMHC	nemetanové uhlovodíky
NO <sub>x</sub>	společné označení dvou hlavních znečišťujících oxidů dusíku NO a NO <sub>2</sub>
NO <sub>2</sub>	oxid dusičitý
SO <sub>2</sub>	oxid siřičitý
$c_i$	úhrnná kapacita v disponibilních vozidlech druhu $i \in I$
$C_{lij}$	náklady na jeden oběh vozidla druhu $i \in I$ typu $j \in J_i$ na lince $l \in L_0$
$c^{(i)}$	vektor koeficientů účelové funkce $i$
č.	číslo
$d$	proměnná omezující vzdálenost hodnot účelové funkce řešení od ideální varianty
$d_l$	druh vozidel používaných na lince $l$
$f_l$	frekvence spojů na dané lince [spoj.h <sup>-1</sup> ]
$h$	hodina
$K$	množina všech přípustných cest
$K_{ij}$	počet vozidel druhu $i \in I$ typu $j \in J_i$ [vozidla]
$k$	počet kritérií
$k_{ij}$	kapacita vozidla druhu $i \in I$ typu $j \in J_i$ [místo]
km	kilometr
$L_0$	širší množina linek

$L_i$	množina linek obsluhovaných druhem dopravního prostředku $i \in I$ .
$L_h$	množina linek obsluhujících hranu $h \in H$ .
m	metr
$m_l$	počet úseků na lince $l$
max	maximum
min	minimum
N	množina přirozených čísel
$N_l$	počet oběhů vozidla na lince $l \in L_0$ [ $\text{h}^{-1}$ ] (předpokládáme, že počet oběhů za hodinu je stejný pro všechny druhy dopravních prostředků a typy vozidel)
$n$	počet druhů dopravních prostředků [-]
$n_{sn}$	počet spojů neprovedených [-]
$n_{sp}$	počet spojů přesných [-]
$n_{spl}$	počet spojů plánovaných podle jízdního řádu [-]
$o_l$	oběžný čas vozidla na lince $l$ [min]
obr.	obrázek
$q_h$	intenzita přepravního proudu na úseku $h \in H$ [cestující. $\text{h}^{-1}$ ]
$q(h)$	kumulovaná intenzita proudu cestujících [cestující. $\text{h}^{-1}$ ]
R	množina reálných čísel
$S_k$	vektor charakteristik popisující uživatele $k$
Tab.	tabulka
tj	to je
$t_p$	doba přemístění [min]
$t_1$	doba chůze od zdroje přemístění k zastávce hromadné osobní dopravy [min]
$t_{\check{c}}$	doba čekání na spoj [min]
$t_{dp}$	doba pobytu v dopravním prostředku [min]
$t_i^{path}$	doba jízdy na cestě $i$ na výchozí zastávce a přestupních zastávkách [min]
$t_l^{turn}$	doba oběhu na lince [min]
$t_{pre}$	doba přestupu (doba chůze a doba čekání na spoj při přestupu) [min]
$t_2$	doba chůze od zdroje přemístění k zastávce hromadné osobní dopravy [min]

$T$	prohibitivní konstanta
$V$	množina vrcholů
$V_{ik}$	deterministická část užitku
$v_{l0}, v_{lm_l}$	koncové uzly linky $l$
$v_{l1}, v_{lm_l-1}$	nácestné uzly linky $l$
$w_i$	váha odchylky $i$ -té účelové funkce od ideální varianty [-]
$x_l$	počet vozidel přidělených na linku $l \in L_0$
$x_{lij}$	proměnná modelující počet vozidel druhu $i \in I$ typu $j \in J_i$ nasazených na linku $l \in L_0$ [vozidlo]
$X^{(r)}$	množina přípustných řešení úlohy při iteraci $r$
$X_{ij}$	hodnota charakteristických vlastností $j$ varianty $i$
$y$	minimální poměrná rezerva
$y_a^{rs}$	proměnná udávající velikosti toků cestujících na jednotlivých hranách z přepravního proudu z $r$ do $s$
$y_i^*$	hodnota účelové funkce při optimálním řešení podle kritéria $i = 1, \dots, k$
$z_{li}$	bivalentní proměnná modelující, zda linka $l \in L$ bude či nebude obsluhována druhem dopravního prostředku $i \in I$
$\gamma_j$	parametr vyjadřující směr ovlivnění a důležitost charakteristické vlastnosti $j$ na užitek
$\varepsilon_{ik}$	chybový člen užitku
$\eta_p$	součinitel přesnosti [-]
$\eta_s$	součinitel spolehlivosti [-]
$\tau$	interval mezi spoji [-]
$\Lambda_a$	maximální frekvence spojů [spoj.h <sup>-1</sup> ]

## 1. ÚVOD

Přeprava osob je nutným důsledkem prostorového rozdělení činností i důsledkem osvojení, využívání a tvorby osídleného prostředí, protože prostřednictvím osobní dopravy se realizují životně důležité komunikační vztahy vznikající vzájemným působením faktorů bydlení, práce, nákupů, vzdělání, odpočinku, kultury, sportu a mnoha dalších společenských aktivit.

Při plnění základních funkcí významných pro města a městské aglomerace zaujímá dominantní postavení městská hromadná doprava. Při současném růstu individuální automobilové dopravy je nutné, za účelem zvyšování atraktivity hromadné veřejné dopravy, stále hledat možnosti zlepšení kvality MHD prostřednictvím zvyšování úrovně její technické základny, technologie a organizace tak, aby zůstala zachována předepsaná dělba přepravní práce. Důvodů, proč má být MHD podporována, je celá řada, namátkově lze uvést zájem na ochraně životního prostředí, propustnosti městských komunikací, ekonomiky společnosti, úspory energií apod.

MHD je primárně určena pro zvládnutí velkých přepravních nároků. Přitom má své specifické výhody zejména v malých nárocích na dopravní plochy, ve větší bezpečnosti, v menším negativním ovlivňování životního prostředí v přepočtu na jednu přepravenou osobu. Funkce městské hromadné dopravy je a bude dána jejími vlastnostmi ve vztahu k uspokojování potřeb přemísťování obyvatel, ve vztahu k životnímu prostředí a investiční náročnosti výstavby pro dopravu. Je třeba zajistit její dokonalou organizaci v rámci dopravního systému města a sladit řídicí, plánovací, organizační, tarifní, investiční a technický rozvoj. Základními požadavky kladenými na MHD je kvalita a hospodárnost. Kvalitu vyžaduje cestující, hospodárnost provozovatel nebo poskytovatel dotací.

Jedním ze základních problémů dopravní praxe v souvislosti s MHD je návrh sítě linek MHD, čemuž se věnuje tato disertační práce.

Chtěl bych na tomto místě vyslovit poděkování své školitelce doc. Ing. Ludmile Jánošíkové, CSc., Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. a všem, kteří mi byli při tvorbě disertační práce oporou a ať již jakoukoliv radou, připomínkou či námětem přispěli ke zvýšení její kvality po věcné i formální stránce.

## **2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE**

V rámci státní doktorské zkoušky byly schváleny následující cíle disertační práce:

- modifikovat vybrané existující přístupy do tvarů, které by umožnily akceptaci požadavků vyplývajících z hodnot kritérií, podle kterých je hodnocena kvalita a hospodárnost služeb v městské hromadné dopravě, resp. navrhnout přístupy nové, které by uvedená kritéria zohlednily,
- na konkrétním příkladu linkové sítě ověřit navržený přístup k tvorbě linkové sítě a vyhodnotit jeho výsledky a praktickou použitelnost.

### 3. KRITÉRIA POSUZOVÁNÍ NAVRŽENÉHO SYSTÉMU MHD

V praxi se v minulosti síť linek nejčastěji tvořila a v současnosti je tomu jinak, na základě zkušeností vyplývajících ze známých např. historických vazeb reflektujících určitý zvykový přístup cestující veřejnosti. Dalšími důvody, svědčícími ve prospěch zkušenostního přístupu, bylo i to, že ještě v nedávné minulosti nebyla k dispozici dostatečná počítačová podpora, která by umožňovala pro řešení uvedeného problému používání sofistikovanějších nástrojů.

S postupující dobou, tak jak již bylo uvedeno v úvodu, je při plánování návrhu sítě linek zapotřebí přihlížet ke kvalitě nabízené služby, což se v minulosti ne vždy dělo. Současně s nárůstem individuální automobilové dopravy se totiž uvažování potenciálních zákazníků začíná radikálně měnit. Potenciální zákazníci začínají v měřítku svých hodnot preferovat výhody poskytované individuální automobilovou dopravou a mnohdy se stává, že jednou ztraceného zákazníka je obtížné získat zpět. Této změně uvažování zákazníků se musí přizpůsobit i změna chování dopravce. Příkladem změn v uvažování dopravců je zavádění integrovaných dopravních systémů, které koncovému uživateli – cestujícímu poskytují celou řadu výhod a eliminují mnohá omezení (což se projevuje např. při unifikaci přepravních dokladů uznávaných více dopravci). V rámci posuzování kvality a efektivity MHD byla formulována celá řada kritérií, u kterých je pochopitelně dáno pořadí jejich důležitosti, běžně se však vyskytuje situace, kdy dosažení optimální hodnoty jednoho z definovaných kritérií způsobí poměrně razantní vzdálení se navrženého řešení od optimální hodnoty kritéria jiného, často i na „nepříjemnou úroveň“. Např. nejvýhodnější řešení z hlediska ekonomické efektivity systému městské hromadné dopravy, reprezentované např. snížením počtu vozidel obsluhující navržené linky, se obvykle značně odlišuje od kvalitativních požadavků a představ potenciálních cestujících, a proto je často nutné hledat kompromisní řešení. Dalším příkladem mohou být cestující, kteří požadují přímé spojení bez přestupů. Pokud by takovéto spojení bylo realizováno, nebudou ochotni platit vysokou cenu jízdného. Z uvedeného důvodu je smysluplné zabývat se hledáním takového řešení, které by umožnilo při návrhu sítě linek akceptovat co největší počet kritérií kvality a hospodárnosti v přijatelných mezích – jinak řečeno řešit úlohu o návrhu sítě linek MHD jako multikriteriální problém.

Je-li cílem uvedených úvah návrh linkové sítě MHD v závislosti na formulovaných kritériích kvality a hospodárnosti, je žádoucí jednotlivá kritéria podrobněji analyzovat, což

bude předmětem následující podkapitoly. Je třeba zdůraznit, že kritéria kvality formulovaná a analyzovaná v následující kapitole zohledňují pouze požadavky cestující veřejnosti, přičemž hodnota kritérií rozhodujících z pohledu cestujícího může být významně ovlivněna hospodárností provozu, což je další z významných faktorů ovlivňující tvorbu sítě linek MHD.

### **3.1 Obecná kritéria hodnocení systému linek MHD**

Kvalita dopravy je celkový souhrn znaků dopravního systému, kterými dopravní systém získává schopnost uspokojovat určené a předpokládané přepravní potřeby. Ty se obvykle transformují na znaky se specifickými kritérii (požadavky na kvalitu). Potřeby mohou např. zahrnovat hlediska provozu, dostupnosti, použitelnosti, spolehlivosti (jako pohotovost, bezporuchovost, možnost rychlé a dostupné údržby a oprav vozidel), bezpečnosti, ekologie, ekonomiky a estetiky. V mnohých případech se potřeby mohou měnit v čase. To vyžaduje nevyhnutelnou periodickou revizi požadavků na kvalitu [34].

Kvalita hromadné osobní dopravy velice úzce souvisí s hybností obyvatel, konkrétně se projevuje v dělbě přepravní práce mezi jednotlivými druhy hromadné osobní dopravy a mezi hromadnou dopravu a individuální automobilovou dopravu.

Kriteria kvality hromadné osobní dopravy jsou multioborovou záležitostí, proto je vhodné rozdělit je podle jejich příbuzných znaků do následujících skupin [34], [35]:

1. doba a rychlost přemístění,
2. bezpečnost dopravy,
3. přepravní příležitost,
4. spolehlivost a přesnost,
5. pohodlí přemístění,
6. informovanost,
7. vlivy na životní prostředí,
8. ekonomické náklady.

#### **Ad 1) Doba a rychlost přemístění**

V hromadné osobní dopravě cestující hodnotí nejen dobu přepravy, ale i dobu celého přemístění tedy „od dveří ke dveřím“. Doba přemístění je definována jako součet doby

chůze na zastávku a ze zastávky, doby čekání na spoj, doby pobytu ve vozidle a doby potřebné na případný přestup. V rámci určité oblasti bude vytvořeno těžiště, tedy jeden bod, který bude reprezentovat zdrojovou oblast.

$$t_p = t_1 + t_{\varepsilon} + t_{dp} + t_{pre} + t_2 \quad [\text{min}] \quad (3.1)$$

kde:

$t_p \dots$	doba přemístění [min]
$t_1 \dots$	doba chůze od zdroje přemístění k zastávce hromadné osobní dopravy [min]
$t_{\varepsilon} \dots$	doba čekání na spoj [min]
$t_{dp} \dots$	doba pobytu v dopravním prostředku [min]
$t_{pre} \dots$	doba přestupu (doba chůze a doba čekání na spoj při přestupu) [min]
$t_2 \dots$	doba chůze od zastávky hromadné osobní dopravy k cíli přemístění [min]

## Ad 2) Bezpečnost dopravy

Kvantitativní hodnocení bezpečnosti dopravy je založeno na statistických údajích o nehodovosti. Hodnocení je realizováno v absolutních číslech a také v relativních číslech jako podíl absolutních údajů o bezpečnosti dopravy a dopravního výkonu v km nebo výkonu v počtu přepravených osob. Absolutní údaje o bezpečnosti dopravy jsou:

- počet nehod mezi vlastními vozidly,
- počet nehod mezi vozidly hromadné osobní dopravy a jinými účastníky silniční, městské a jiné dopravy,
- počet nehod s vlastním zaviněním, počet nehod s cizím zaviněním,
- počet a závažnost zranění,
- výše hmotné škody ve finančním vyjádření.

## Ad 3) Převážní příležitost

Plnění požadavků na hromadnou osobní dopravu je často spojováno s hodnocením příležitosti k přepravě. Převážní příležitost v osobní dopravě je dána hlediskem časovým, prostorovým a přepravní kapacitou linky. Z časového hlediska je převážní příležitost schopnost přepravit cestujícího v požadovaném čase, dni a v přijatelné době přemístění mezi zdrojem a cílem cesty. Převážní příležitost se posuzuje prostřednictvím:

- doby provozu na lince,
- pravidelnosti nabídky počtu spojů v době provozu na lince,



- dostupnosti zastávek,
- dostupnosti cíle cesty,
- hustoty dopravní sítě,
- hustoty a rozmístění zastávek,
- součinitele využití kapacity vozidel ve zvoleném profilu tratě,
- poměru maximálního přepravního proudu na lince a přepravní kapacity linky.

Podrobnější informace jsou uvedeny v literatuře [34].

#### **Ad 4) Spolehlivost a přesnost dopravy**

Zákazník tedy cestující očekává, že bude přepraven v prostoru a čase podle jízdního řádu. Míra spolehlivosti a přesnosti dopravy se určuje porovnáním skutečného průběhu spojů se stanoveným jízdním řádem.

**Spolehlivost dopravy** hodnotí úroveň naplnění jízdního řádu v tom, že jsou plánované spoje provedeny ve stanoveném počtu a celé. Při plánování linkové sítě musí být zvažováno, že všechny spoje musí být provedeny. Spolehlivost dopravy se posuzuje prostřednictvím hodnoty součinitele spolehlivosti:

$$\eta_s = \frac{n_{spl} - n_{sn}}{n_{spl}} \quad (3.2)$$

kde:

$\eta_s$  ... součinitel spolehlivosti [-]

$n_{spl}$  ... počet spojů plánovaných podle jízdního řádu [-]

$n_{sn}$  ... počet spojů neprovedených [-]

Čím vyšší je hodnota součinitele spolehlivosti, tím vyšší počet spojů byl proveden podle jízdního řádu. Maximalizace spolehlivosti je otázka jednak správnosti sestaveného jízdního řádu, ale také zohlednění disponibilního vozidlového parku, konkrétně s problematikou průměrného stáří vozidel, opravárenských kapacit daného podniku (počet opravárenských stanišť a jejich výkonnost), nebo zavedeného systému preventivní údržby.

**Přesnost dopravy** charakterizuje úroveň naplnění jízdního řádu porovnáním skutečného průběhu spojů z hlediska času s údaji uvedenými v jízdním řádu. Přesnost dopravy se posuzuje prostřednictvím hodnoty součinitele přesnosti:

$$\eta_p = \frac{n_{sp}}{n_{spl}} [-] \quad (3.3)$$

kde:

$\eta_p$  ... součinitel přesnosti [-]

$n_{sp}$  ... počet spojů přesných [-]

$n_{spl}$  ... počet spojů plánovaných nebo celkem hodnocených [-]

Čím vyšší je hodnota součinitele přesnosti, tím vyšší je počet spojů, které nevykazují zpoždění.

#### **Ad 5) Pohodlí přemístění**

Skupina kritérií týkající se pohodlí přemístění je mnohdy za současného stupně poznání obtížně kvantifikovatelná, na straně jedné se vyskytují kritéria, která kvantifikovat lze (míra obsazení vozidla apod.), na straně druhé existují kritéria, která kvantifikovat nelze (jde o kritéria závislé na subjektivních vjemech cestujícího).

Je zřejmé, že nepohodlí v hromadné osobní dopravě zvyšuje fyzickou a psychickou únavu. Některá kritéria pohodlí jako je míra obsazení vozidla, počet stojících osob na  $1m^2$ , hluk, časová dostupnost, doba čekání na spoj, přesnost, přestupovost, vibrace, osvětlení, teplota, vlhkost vzduchu, zrychlení, zpomalení je možno měřit přímo. Jiná kritéria jako je ochrana osob na zastávce před nepříznivými povětrnostními vlivy, estetika, čistota, vybavenost interiéru vozidla, výhled z vozidla, způsob a technika jízdy řidiče, chování pracovníků dopravce apod. je možné zjistit jen nepřímo, subjektivně např. dopravně-sociologickým průzkumem. Skupinu kritérií pohodlí přemístění je možné členit na:

- pohodlí mimo vozidlo,
- pohodlí ve vozidle.

#### **Pohodlí mimo vozidlo**

Pohodlí mimo vozidla hodnotí fyzickou a psychickou stránku cestujícího v době jeho příchodu na zastávku a odjezdu ze zastávky a v průběhu čekání na spoj. Tato skupina obsahuje následující kritéria:

- časová dostupnost zastávek,
- prostorová dostupnost zastávek,
- doba čekání na spoj,
- přesnost dopravy,
- přestupovost v dopravní síti hromadné osobní dopravy,
- ochrana osob na zastávce před nepříznivými povětrnostními vlivy, prachem a hlukem,
- úroveň mikroklimatu na zastávce,
- ochrana osob před dopravními prostředky,
- osvětlení zastávky,
- estetika a čistota zastávky,
- plocha k stání a počet míst k sedění na zastávce,
- možnost zakoupení jízdenky před nástupem do vozidla,
- výškový rozdíl úrovně nástupiště a nástupních a výstupních úrovní vozidel,
- vnější čistota vozidel.

### **Pohodlí ve vozidle**

Důležitost pohodlí ve vozidle je ovlivněna častým používáním hromadné osobní dopravy, velkou koncentrací cestujících, ze které vyplývá obsazení vozidla a také relativně krátkou dobou pobytu v dopravním prostředku. Tato skupina kritérií hodnotí fyzickou a psychickou stránku pobytu cestujícího ve vozidle po dobu přepravy a patří do ní:

- nabídka počtu míst k sedění a počtu míst k stání, jejich dimenze a uspořádání,
- obsazení vozidla,
- vybavenost interiéru,
- výhled z vozidla,
- mikroklima,
- estetika, čistota a hygiena interiéru,
- osvětlení interiéru,
- hlučnost,
- vibrace.

*Nabídka počtu míst k sedění a počtu míst k stání, jejich dimenze a uspořádání* jsou hodnoceny počtem míst k sedění a stání, poměrem počtu míst k stání k počtu míst k sedění, plochou určenou na 1 místo k sedění, plochou určenou na 1 místo k stání vzhledem

k očekávanému obsazení vozidla, dále rozměry a výškou sedadel a opěradel, vzdáleností mezi opěradly sedadel, uspořádáním sedadel vzhledem k průchodu mezi sedadly.

*Obsazení vozidla* je hodnoceno počtem přepravovaných osob ve vozidle ale hlavně počtem stojících osob na  $1m^2$  podlahové plochy vozidla.

*Vybavenost interiéru* vozidla je hodnocena počtem, rozměry a uspořádáním dveří, schodů, tyčí, madel a kvalitou podlahy vozidla a existencí prostoru pro umístění kočárků, případně vozíku usnadňujících pohyb imobilních občanů apod.

*Výhled z vozidla* je hodnocen počtem a velikostí oken a jejich průhledností.

*Mikroklima* je hodnoceno teplotou, vlhkostí a množstvím přiváděného vzduchu do vozidla.

*Estetika, čistota a hygiena interiéru* vozidla jsou hodnoceny subjektivně úrovní estetiky, čistoty a hygieny.

*Osvětlení interiéru* je hodnoceno svítivostí při plném a tlumeném osvětlení.

*Hlučnost* je hodnocena hladinou vnitřního hluku.

*Vibrace* jsou hodnoceny úrovní odpružení vozidla v průběhu jízdy.

#### **Ad 6) Informovanost**

Komplexně řešená informovanost cestujících může nejen zlepšit pohodlí přemístění, ale i jeho dobu. Cestující očekává informace o současném, probíhajícím a budoucím stavu sítě hromadné osobní dopravy, linek a zastávek, o odchodech spojů ze zastávek, o trvalých a dočasných změnách v jízdních řádech a v provozu, o průběhu jízdy, o příslušnosti vozidel linkám, o jejich směru jízdy, apod.

#### **Ad 7) Vlivy na životní prostředí.**

Tato skupina kritérií je zaměřena na hodnocení negativních dopadů hromadné osobní dopravy na životní prostředí na území, na kterém je hromadná osobní doprava provozována. Negativní dopady hromadné osobní dopravy na životní prostředí se hodnotí podle rozsahu:

- odpadů,
- emisí,
- hlučnosti,

- vibrací,
- estetiky a psychického rušení prostředí.

**Odpady** jsou hodnoceny kvantitativně jejich rozsahem např. písku v provozu tramvají, opotřebovaných pneumatik, obalů od provozních hmot, oleje, pohonných hmot, provozních kapalin, ale hlavně úrovní exhalací, tj. úrovní znečišťování ovzduší výfukovými plyny spalovacích motorů.

Jak již bylo zmíněno výše doprava má na svědomí velké procento spotřeby energie a v důsledku toho též vyprodukovaných emisí. Jde o zejména o emise CO<sub>2</sub>, CO, HC, NMHC, NO<sub>x</sub> (jako NO<sub>2</sub>), SO<sub>2</sub> a prachové částice. Příčinou produkce emisí je používání převážně fosilních energetických médií. Důsledkem produkovaných emisí je snižování kvality životního prostředí.

**Emise** jsou hodnoceny množstvím pevných částic v 1m<sup>3</sup> vzduchu. To závisí také na čistotě komunikací, konstrukci vozidel a jejich rychlosti.

**Hlučnost** je hodnocena hladinou vnějšího hluku.

**Vibrace** jsou hodnoceny v určité vzdálenosti od trasy dopravních cest hromadné osobní dopravy.

**Estetika a psychické rušení prostředí** je subjektivně hodnocené kritérium. V rámci tohoto kritéria uživatelé systému MHD, resp. potenciální cestující posuzují architektonické řešení zastávek, dopravní cesty včetně trolejového vedení, ukončení linek, odstavné plochy pro hromadnou osobní dopravu, dopravní prostředky a jejich čistotu.

#### **Ad 8) Cena za přemístění**

Cena za přepravu je významná v hodnocení kvality dopravy, protože cestující spojuje kvalitu hromadné osobní dopravy s cenou. Základním ekonomickým kritériem pro používání MHD cestujícími je cena jízdného. Cena jízdného veřejné osobní dopravy by měla být nižší, než jsou přímé náklady na provoz osobního automobilu.

### **3.2 Kritéria se vztahem k trasám a frekvencím linek**

Při návrhu sítě linek MHD je třeba přihlížet k mnoha faktorům. Nejdůležitějším však je, aby cestujícím byla poskytována kvalitní služba za přijatelnou cenu a aby dopravce při poskytování služby vynaložil náklady, které budou akceptovatelné pro poskytovatele dotací. Cílem je tedy hledat určitý kompromis mezi spokojeností cestujících

a hospodárností provozu. Kritéria hodnocení je tedy nutno posuzovat ze dvou úhlů pohledů, a to:

- z pohledu cestujících,
- z pohledu dopravce.

V rámci definovaných kritérií existují kritéria, která je možno přiřadit k některé z uvedených dvou skupin, u jiných kritérií je jednoznačné přiřazení obtížné, protože mohou náležet do obou skupin současně.

### **3.2.1 Kritéria hodnocení z pohledu cestujících**

Do první skupiny kritérií je možno zařadit kritéria uvedená v kapitole 3.1 pod body jako 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8. Nejvýznamnějším kritériem z pohledu cestujícího je doba přemístění. Cestující je ochoten zaplatit za cestu více, ale pod podmínkou, že cesta bude rychlá, flexibilní a bez přestupů. Kvalita, kterou vnímá cestující veřejnost, se často diametrálně liší od možností dopravce, který systém MHD provozuje.

### **3.2.2 Kritéria hodnocení z pohledu dopravce**

Kritéria hodnocení z pohledu dopravce jsou označena v kapitole 3.1 jako 2, 4, 7, 8 (viz rozdělení 3.1). Při respektování základního předpokladu o tom, že doprava musí být bezpečná, spolehlivá a přesná je rozhodujícím kritériem hospodárnost, která se posuzuje prostřednictvím nákladů vynaložených na realizaci určitého objemu výkonů v souvislosti s plněním přepravních požadavků cestující veřejnosti. Náklady na realizaci výkonů v dopravě je možno kalkulovat pomocí oborových kalkulačních vzorců, např. v literatuře [34] je uveden kalkulační vzorec pro autobusovou a trolejbusovou dopravu. Kalkulace nákladů na jednotku výkonu je velice problematickou záležitostí, protože náklady v rámci interního účetnictví nejsou klíčovány pro potřeby optimalizačních metod a navíc bývají zpravidla informacemi interního charakteru.

Je pochopitelně žádoucí, aby požadavky cestující veřejnosti byly splněny s vynaložením co nejnižších nákladů. Minimální náklady při nezměněné výši dotace mohou významně ovlivnit cenu za přemístění, což je jedno z kritérií kvality analyzované v podkapitole 3.1.

Následující kapitola již bude věnována metodám návrhu sítě linek MHD.

## 4. GENEZE ŘEŠENÍ PROBLÉMU NÁVRHU SÍTĚ LINEK MHD

V rámci podkapitoly 4.1 bude pozornost věnována skupinám přístupů k navrhování sítě linek MHD sestavených v minulosti. Základním kritériem klasifikujícím v minulosti sestavené metody bude pro potřeby práce fakt, zda využívají při řešení exaktní anebo heuristické přístupy.

V případě existence více metod spadajících do jednotlivých skupin, budou jednotlivé metody chronologicky seřazeny a stručně charakterizovány, vybrané stěžejní metody budou popsány podrobněji.

### 4.1 Heuristické metody

#### **Metoda založená na analýze současného stavu přemísťování osob**

Metoda je uvedena v literatuře [34]. V některých krocích se vhodně kombinuje s metodou zohledňující strategii cestování [35], která bude popsána v následující podkapitole 4.2.

Metoda vychází z logického požadavku, že vedení linek MHD musí být v souladu s přepravními potřebami obyvatel.

Na dopravní síti s velkým počtem uzlů je problémem velký počet teoreticky možných linek. Pro potřeby začátku řešení je možné za vhodnou linku považovat minimální cestu na dané síti vedoucí mezi dvěma libovolnými zastávkami (zónami). Kdyby se hledala optimální množina linek výběrem ze všech teoreticky možných linek, doba řešení by byla příliš dlouhá. Proto se vytváří redukováná počáteční množina linek.

Z hlediska dosažení co nejlepší suboptimální množiny linek je žádoucí, aby počáteční množina linek obsahovala cesty charakteristické vysokou intenzitou přepravního proudu. Tato intenzita je stanovena jako dolní mez pro přímé přepravy bez přestupu.

Postup řešení je rozdělen do následujících devíti kroků:

1. Sestavení zakódované maximální dopravní sítě, která je tvořena všemi technicky způsobilými dopravními úseky pro dopravní prostředky hromadné osobní dopravy.
2. Sestavení matice meziokrskových přepravních vztahů (tj. po dělbě přepravní práce) pro zvolené časové období. Se znalostí přepravní nerovnoměrnosti se řeší dopravní síť pro období přepravní špičky a přepravního sedla zvlášť. Může se tak vytvořit rozdílná soustava linek pro přepravní špičku a sedlo. „Sedlové linky“ jsou

v provozu během celého provozního dne, také v dnech pracovního volna a pracovního klidu.

3. Přiřazení přepravních vztahů na maximální dopravní síť metodou nejkratší trasy (případně metodou dvou a více tras). Současně se provede záznam intenzity přepravního proudu na úsecích maximální dopravní sítě a zjistí se výsledná intenzita každého úseku.
4. Porovnání výsledné intenzity přepravního proudu každého úseku maximální dopravní sítě s přepravní kapacitou úseku. V případě překročení mezní přepravní kapacity se určí nejbližší vyšší náhradní trasa pro vhodný přepravní vztah mimo tento úsek tak, aby se předem optimálně ovlivnil návrh linkového vedení.
5. Sestavení linek na maximální dopravní síti. Tento krok je mimořádně náročný a složitý. Vychází se z matematické formulace řešení, jak je uvedeno v literatuře [34].
6. S použitím metody nejkratší trasy (nebo metody více tras) se provede přiřazení meziokrskových přepravních vztahů na dopravní síť linek sestavených v 5. kroku. To znamená, že tato dopravní síť už neobsahuje všechny původní dopravní cesty maximální dopravní sítě. Součástí řešení je:
  - stanovení potřebných linkových intervalů dopravy (nebo počtu spojů), které odpovídají maximální intenzitě přepravního proudu a kapacitě vozidel na vyřešených linkách,
  - výpočet jednotlivých složek doby cesty, tj. doby čekání na spoj při prvním nástupu do vozidla, cestovní doby mezi uzly a doby přestupu,
  - stanovení časové penalty za přestup,
  - sestavení stromu minimální doby přepravy ze všech těžišť dopravních okrsků a uzlů na dopravní síti,
  - přiřazení přepravních vztahů na dopravní síť,
  - záznam intenzity přepravního proudu na úsecích dopravní sítě a zjištění jejich výsledných hodnot.
7. Porovnání výsledné intenzity přepravního proudu každého úseku dopravní sítě s přepravní kapacitou úseku. V případě překročení mezní přepravní kapacity úseku



se změny kapacity vozidel nebo provede změna vedení linky, změna organizace dopravy v dané oblasti, provedou se stavební úpravy dopravních cest za účelem zvětšení kapacity úseku nebo skupinového odbavování vozidel na zastávkách. Také je možné zavést odpovídající preferenci hromadné osobní dopravy.

8. Provede se výsledné řešení varianty dopravní sítě hromadné osobní dopravy, které obsahuje úpravu intervalů dopravy na jednotlivých linkách (počtu spojů) a prostorové ukončení linek. V případě, že se změny linkových intervalů, opakují se kroky 6, 7, 8.
9. Provede se vyhodnocení vyřešené varianty dopravní sítě podle zvolených kritérií optimálnosti dopravní sítě.

Za účelem rozhodování o změně dopravní sítě hromadné osobní dopravy je zpracováno několik variant a z nich je vybrána nejvhodnější. Jednotlivé varianty řešení je nutné koncipovat systematicky s přibližováním se k parciálním extrémům závisle proměnných veličin postupnými změnami ovlivňujících jevů.

Výše uvedená metoda se však vyznačuje základní nevýhodou, a to, že řešení pomocí ní navržená nejsou řešeními optimálními (což plyne ze složitosti problému).

V následující podkapitole bude uveden přehled metod, které při řešení využívají matematické postupy a jsou zaměřeny na vyhledávání optimálních řešení.

Průkopnickým přístupem v této skupině metod je Lampkinova a Saalmansova práce [25]. Autoři navrhuji dekomponovat řešenou úlohu na dvě dílčí úlohy. V první dílčí úloze se řeší problém návrhu tras linek a ve druhé dílčí úloze se navrženým trasám linek přiřazují frekvence spojů. Řešení obou dílčích úloh je založeno na použití heuristických přístupů. Při řešení první dílčí úlohy je optimalizačním kritériem počet ujetých osobokilometrů. Výhodnost volby trasy je posuzována podle výhodnostního koeficientu – počtu ušetřených osobokilometrů. Při takto nastaveném výhodnostním koeficientu budou při výběru tras linek přepravním proudům vyznačujícím se většími objemy cestujících přiřazována přímá spojení. Při řešení druhé dílčí úlohy, kdy se pro vybrané linky určují frekvence, se opět používá heuristický přístup, při kterém se mezi vybrané linky rozděluje vozidla v závislosti na možnostech disponibilního vozidlového parku. Vlastní rozdělování probíhá v závislosti na minimalizaci celkové doby jízdy všech cestujících.

Jistou modifikaci do tohoto přístupu zavedli Dubois, Bel a Llibre, kteří uvažují s proměnlivou poptávkou po přepravě v závislosti na vedení linek [15]. Postup řešení rozdělují do tří fází. V první fázi se podle navrhovaného přístupu vyhledá soustava městských komunikací, na kterých bude MHD provozována. V této etapě se upřednostňují ta řešení, která umožní minimalizovat celkovou dobu přepravy cestujících při respektování investičních omezení. V druhé fázi se na vybrané komunikační síti uskuteční návrh sítě linek. Předpokládá se, že v případě výběru nevhodné trasy linky dojde k určitému úbytku zájmu cestujících o přepravu. V poslední fázi se určí frekvence spojů na linkách vybraných v předchozí fázi v závislosti na měnící se poptávce. Výsledná matice poptávky se bude svými hodnotami lišit o počet cestujících, kteří na základě navržené sítě linek veřejnou hromadnou dopravu nepoužijí. Cílem pochopitelně je, aby pokles hodnot prvků ve výsledné matici byl ve srovnání s hodnotami prvků ve výchozí matici co nejmenší.

Specifickou skupinu těchto metod tvoří metody založené na bázi umělé inteligence. Jako první metody umělé inteligence využili autoři Shih a Mahmassani [33], jejichž poznatky dále rozpracovali autoři Fan a Machemehl [18]. V navrženém přístupu používají stejná kritéria i celkový postup. Vygeneruje se výchozí množina linek s využitím základních parametrů systému (minimální a maximální délka trasy, počet zón, průměrná cestovní rychlost vozidla, rozmístění zdrojů a cílů přepravních proudů). K určení výchozí množiny linek autoři navrhuji využít Dijkstrova algoritmu pro vyhledání minimálních cest v grafu – modifikaci s pevným označováním uzlů. V dalším kroku nastává výběr linek z výchozí množiny linek pomocí heuristických procedur k vyhodnocení navržené sítě linek z hlediska zvolených kritérií. V rámci vyhodnocení dochází k vhodnému (očekávanému) rozložení poptávky na úseky dopravní sítě a následně se přiřadí frekvence zvoleným linkám. Protože nalezení optimálního řešení z hlediska všech zvolených kritérií tradičními optimalizačními metodami není v reálných sítích možné, zmiňují se autoři o možnostech využití heuristických a metaheuristických metod, jako jsou genetické algoritmy, metaheuristiky simulated annealing a tabu search.

Při stanovení frekvencí se v navržené metodě zohledňují tři typy frekvencí - nabídková, poptávková a pojistná frekvence. Výsledná frekvence linky se vytváří v závislosti na poptávkové frekvenci a pojistné frekvenci. Poptávková frekvence se vypočítá na základě maximální hodinové intenzity cestujících na dané trase, kapacity nasazených vozidel a uživatelem definovaného zatížení. Pojistná frekvence do jisté míry vytváří rezervu umožňující pokrýt i zvýšené nároky na přepravu. Nabídková frekvence

vychází z rozhodnutí dopravce. Může jít o frekvence, které jsou předdefinovány, přičemž mohou být pro všechny linky stejné, ale také se mohou lišit v závislosti na poptávce. Prostřednictvím iteračního procesu dochází k přepočtům nabídkových frekvencí tak dlouho, dokud výsledná frekvence nezohledňuje poptávkovou a pojistnou frekvenci.

Výhodami navrženého přístupu jsou skutečnosti, že přístup zohledňuje všechny složky času, které cestující stráví při cestování městskou hromadnou dopravou, a dále to, že se při návrhu tras a frekvencí linek uplatňují pravidla stanovená praxí. Nevýhodou je, že návrh dobré konfigurace linek trvá dlouho, neboť po každé změně konfigurace sítě linek je v rámci iterace nutno přepočítat frekvence a upravit trasy cestujících.

Z vícefázových metod bude podrobněji rozebrána metoda zohledňující strategii cestování publikovaná v literatuře [22].

### **Metoda zohledňující strategii cestování**

Metoda vychází ze strategie přemístění definované následovně: cestující si vybírá takový způsob přemístění, při kterém dosáhne nejkratší dobu přemístění s ohledem na jízdné, případné přestupy, pohodlí a další jím subjektivně preferovaná kritéria kvality. Přitom, pokud má možnost použít jinou rovnocennou linku použije první možný spoj jedoucí v požadovaném směru přepravy.

V rámci optimalizační úlohy se z hlediska přípustnosti navrženého řešení rozlišují řešení úplně přípustná a relativně přípustná. Jsou-li všichni cestující přepraveni tím spojem, který si zvolili – jedná se o úplně přípustné řešení, jsou-li cestující přepraveni, ale s omezením ve výběru spoje z kapacitních důvodů, jedná se o relativně přípustné řešení. Existují-li cestující, jejichž přepravní požadavky nejsou navrženou soustavou linek splněny, jedná se o nepřípustné řešení.

Postup řešení spočívá ve vyhledání takové konfigurace sítě linek, která odpovídá úplně přípustnému nebo relativně přípustnému řešení. Vstupem do řešícího algoritmu je počáteční množina linek (tzv. kandidáti na linky).

Optimalizační úloha je definována následovně: má se vyhledat množina linek a stanovit jejich frekvence tak, aby bylo dosaženo minimální celkové cestovní doby a minimálního počtu vozidel v dopravní síti.

Určení suboptimálního řešení množiny linek vychází z dané počáteční množiny linek [22].

Řešení optimalizační úlohy probíhá ve třech základních etapách:

- Redukce linek. Z počáteční množiny linek jsou postupně vylučované nejméně perspektivní linky. Tato etapa končí, když se dojde k požadovanému, zadanému počtu linek, anebo když každé další vyloučení linky znamená ztrátu přípustnosti řešení.
- Distribuce dopravních prostředků. Daný počet dopravních prostředků je přiřazený na linky tak, aby byl minimalizovaný celkový čas čekání na spoj. Nutnou podmínkou řešitelnosti je podmínka, aby počet dopravních prostředků byl větší nebo rovný počtu linek. Úlohu je možné efektivně řešit např. metodou dynamického programování.
- Redistribuce dopravních prostředků. Vychází se z dané množiny linek a daného počátečního přiřazení dopravních prostředků na tyto linky. Algoritmus spočívá v postupném a systematickém přesunu dopravních prostředků z linky na linku, když se jeví tento přesun výhodný z hlediska účelové funkce. Hledaná suboptimální množina linek je tvořená linkami s nenulovým počtem přiřazených dopravních prostředků.

Z dostupné literatury je známo, že uvedeného přístupu bylo použito při návrhu sítě linek MHD ve městě Poprad [22].

### **Shrnutí**

Závěrem textu věnovaného heuristickým metodám je nutno uvést, že nelze očekávat, že jimi získaná řešení budou optimální, ale výsledky mohou být pro cestující veřejnost akceptovatelné.

## **4.2 Exaktní metody**

Společným rysem dále uvedených exaktních přístupů je, že předpokládají existenci širší množiny linek, z nichž dochází k výběru. To znamená, že trasy potenciálních linek byly navrženy dopravním expertem předem a návrh tras není součástí řešení. Výhodami uvedených modelů je skutečnost, že se v rámci jednoho řešení zpravidla podaří vyřešit nejen výběr soustavy linek, ale pro každou linku se určí i počet přidělených vozidel (z čehož se dá následně odvodit i frekvence linek). U těchto metod dochází k návrhu sítě linek a přiřazení vozidel na linky v rámci jednoho výpočetního postupu.

Pozornost bude věnována následujícím metodám návrhu sítě linek MHD:

- metoda minimalizující celkové časové ztráty cestujících,
- metoda maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích dopravní sítě,
- přístup označovaný v literatuře pojmem Column Generation.

### **Metoda minimalizující celkové časové ztráty cestujících**

Původními autory této myšlenky jsou S. Erlander a S. Schéeleová [11], [17]. Její podstata spočívá v tom, že pokud máme definovanou „širší“ množinu linek  $L_0$ , tak výběr linky  $l \in L_0$  do užší množiny  $L$  se nebude dít pomocí bivalentní proměnné, jak by se dalo očekávat (když proměnná nabude hodnoty 1, linka bude provozována, když proměnná nabude hodnoty 0, linka nebude provozována), ale pomocí celočíselné nezáporné proměnné  $x_l$ , která vyjadřuje počet vozidel přidělených na linku  $l \in L_0$ . Při  $x_l > 0$ , linka bude provozována, při  $x_l = 0$ , linka nebude provozována. Výhodou uvedeného modelu je, že se v rámci jednoho řešení vyřeší nejenom výběr soustavy linek, ale pro každou linku se určí i počet přidělených vozidel.

S. Erlander a S. Schéeleová formulují pro neznámé  $x_l$ ,  $l \in L_0$  tato ohraničení:

1. Počet vozidel rozdělený na linky nesmí překročit kapacitu vozidlového parku.
2. Každý přepravní požadavek musí být splněn, tj. na všech úsecích ležících na jeho trase musí být k dispozici dostatečná kapacita na linkách, které tyto úseky obsluhují.

Do výsledného systému jsou pak vybrány jen ty linky, pro něž platí  $x_l > 0$ .

Ačkoliv byl tento model výrazným pokrokem v dopravní teorii, příliš se v praxi nerozšířil, zejména proto, že důležitou složkou časových ztrát cestujících je průměrná doba čekání na spoj, která se rovná polovině intervalu, tedy  $o_l/2x_l$ , kde  $o_l$  je doba oběhu vozidla na lince  $l$ , a tedy proměnná je ve jmenovateli, tj. nacházíme se v nelineárním programování, kde se optimalizační úlohy řeší velmi obtížně. Model byl použit ve švédském městě Linköping [11].

Jako další lze uvést přístup autorů Constantina a Floriana [5], kteří sestavili model určující frekvence na jednotlivých linkách při minimalizaci cestovních a čekacích dob všech cestujících. Základním omezením vystupujícím v úloze je kapacita disponibilního

vozidlového parku. Autoři ve své práci sestavili nelineární nekonvexní smíšený celočíselný model, který byl následně transformován do podoby dvouúrovňového min-min problému.

### **Metoda maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích dopravní sítě**

Autory následujícího přístupu jsou A. Černá a J. Černý [6], [7], [8], [12]. Model těchto autorů si zachovává základní myšlenku o současném řešení výběru linek a přidělení vozidlového parku, jak je popsáno v literatuře [11].

Problém je možno formulovat následovně. Je dána hranově ohodnocená dopravní síť  $S = (V, H, q)$ , na které je definována širší množina linek  $L_0$ , přičemž linka  $l \in L_0$  :  $l = (o_l, d_l, m_l, v_{l0}, \dots, v_{lm_l})$  je charakterizována následujícími parametry:

- $o_l$  ... oběžný čas vozidla na lince  $l$ ,
- $d_l$  ... druh vozidel používaných na lince  $l$ ,
- $m_l$  ... počet úseků na lince  $l$ ,
- $v_{l0}, v_{lm_l}$  ... koncové uzly linky  $l$ ,
- $v_{l1}, v_{lm_l-1}$  ... nácestné uzly linky  $l$ .

Pro každou hranu  $h \in H$  je definována kumulovaná intenzita proudu cestujících  $q(h)$ , je-li hrana obsluhována obousměrně, pak půjde o dvojici údajů. V dalším textu bude uvažováno, že bude k dispozici širší množina kyvadlových linek, je tedy možno dvojici uvedených údajů nahradit jednou hodnotou, a to maximem. Splní-li se požadavek na přepravu s vyšší intenzitou, splní se také požadavek ve směru s intenzitou nižší.

Dále je k dispozici úhrnná kapacita  $c_i$  v disponibilních vozidlech druhu  $i \in I$ , kde  $I$  je množina druhů dopravních prostředků. Symbolem  $L_i$  bude označena množina linek obsluhovaných druhem dopravního prostředku  $i \in I$ . Symbolem  $L_h$  bude označena množina linek obsluhujících hranu  $h \in H$ .

Pro každou linku  $l \in L_0$  pak autoři definovali nezápornou proměnnou  $x_l$  reprezentující výkonnost linky  $l \in L_0$  (počet míst, která nabídnou vozidla linky na úseku dopravní sítě za určitou časovou jednotku). Do výsledného systému jsou pak vybrány jen ty linky,

pro něž platí  $x_l > 0$ . Na rozdíl od S. Erlander a S. Schéeleové autoři v účelové funkci neminimalizují časové ztráty cestujících, ale maximalizují minimální z poměrných rezerv  $y$  mezi nabízeným počtem míst a průměrným počtem cestujících na daném úseku, přičemž zachovávají významné výhody modelu původního (současný výběr linek a přidělení kapacity vozidlového parku).

Matematický model má tvar:

$$\max f(y) = y \quad (4.1)$$

za podmíněk:

$$\sum_{l \in L_i} o_l x_l \leq c_i \quad \text{pro } i \in I \quad (4.2)$$

$$\sum_{l \in L_h} x_l \geq y \cdot q(h) \quad \text{pro } h \in H \quad (4.3)$$

$$x_l \geq 0 \quad \text{pro } l \in L_0 \quad (4.4)$$

$$y \geq 0 \quad (4.5)$$

Výraz (4.1) je účelová funkce modelu, omezující podmínky typu (4.2), jejichž počet odpovídá počtu druhů dopravních prostředků, zajišťují, že kapacita disponibilního vozidlového parku pro každý druh dopravního prostředku  $i \in I$  nebude překročena, omezující podmínky typu (4.3), jejichž počet odpovídá počtu úseků dopravní sítě, zajistí, že na každém úseku bude nabídnuto minimálně tolik míst, kolik odpovídá minimální poměrné rezervě. Omezující podmínky typu (4.4) a (4.5), jejichž počet odpovídá počtu proměnných, jsou obligatorními podmínkami.

Navržený model, známý v odborné literatuře také pod názvem PRIVOL, se již dá řešit lineárním programováním, což ve srovnání s původním modelem navrženým S. Erlanderem a S. Schéeleovou umožňuje zvládnout i mnohem rozsáhlejší úlohy.

Použití modelu přichází v úvahu zejména v situacích, kdy na některých úsecích dopravní sítě není k dispozici dostatečná kapacita míst pro cestující veřejnost.

Jak je z tvaru modelu patrné, jedná se o model jednokriteriální optimalizace, přičemž optimalizačním kritériem je minimální poměrná rezerva mezi počtem nabídnutých míst a průměrným počtem požadovaných míst na jednotlivých úsecích dopravní sítě a v rámci optimalizace se její hodnota maximalizuje.

Navíc autoři ve své práci vytvořili natolik univerzální model, že umožňuje modifikace do celé řady verzí, které se od sebe liší především optimalizačním kritériem, o čemž svědčí následující přehled prací. V práci [37] je demonstrována varianta modelu umožňující minimalizovat počet vozidel, který má být za účelem obsluhy požadavků v síti použit, práce [43] uvádí variantu modelu minimalizující objem emisí produkovaných dopravními prostředky, práce [44] uvádí model ve variantě minimalizující celkové náklady na provoz vozidel apod. Sestavený model je navíc možno použít jak v případě homogenního, tak i v případě heterogenního vozidlového parku, což je podloženo článkem [13].

V dostupné literatuře jsou k dispozici informace, že model PRIVOL byl na území České republiky použit pro návrh linkové sítě MHD v Pardubicích, s ohledem na rozhodnutí vedení města však získané výsledky nebyly uvedeny do praxe [7]. Zatímco ve městě Pardubice se výsledky optimalizačního výpočtu nepodařilo realizovat, na Slovensku byl model PRIVOL úspěšně použit při návrhu sítě linek ve městech Martin [11], Žilina [7], Piešťany, Košice, Trenčín a Považská Bystrica [22].

Například v Žilině se pomocí uvedeného modelu podařilo významně zpřehlednit síť linek (původní počet provozovaných linek byl při respektování rozhodujících přepravních směrů redukován z 34 na 14).

V dalším textu bude podrobněji charakterizován jeden z přístupů z poslední doby, a to přístup založený na metodě generování sloupců, který navrhli Borndörfer, Grötschel a Pfetsch [3]. I jejich přístup je založen na existenci širší množiny linek. V rámci navrženého postupu se optimalizují dva protichůdné cíle, z pohledu dopravního podniku se minimalizují provozní náklady a z pohledu cestujících se minimalizuje doba cestování. Ve svém přístupu autoři vytvářejí takový model, který nalezne linky a jejich odpovídající frekvence tak, aby mohla být splněna poptávka po přepravě v celé dopravní síti.

Autoři formulují problém následovně. Je dána multimodální dopravní síť reprezentovaná digrafem  $G_d = (V, A)$ , ve kterém vrcholová množina  $V$  představuje množinu zastávek a prvky hranové množiny  $A$  reprezentují mezizastávkové úseky. Pro každý úsek  $a \in A$  je stanovena maximální frekvence spojů  $\Lambda_a$ . Je daná širší množina linek  $L_0$ . Pro každý úsek  $a \in A$  je definována množina linek  $L_a$  obsluhujících tento úsek a jízdní doba  $t_a$ . Na daném digrafu je definována OD matice  $D$ , přičemž prvek této matice  $d_{st}$  reprezentuje poptávku po přepravě z vrcholu  $s \in V$  do vrcholu  $t \in V$  za zvolené časové



období. Dále je na zadaném digrafu definována množina tras cestujících  $P$ , přičemž  $P_{st}$  je množina cest, vedoucích z vrcholu  $s \in V$  do vrcholu  $t \in V$  a  $P_a$  je množina cest procházející úsekem  $a$ . Jízdní doba na cestě  $p \in P$  je definována jako  $t_p = \sum_{a \in p} t_a$ . Pro každou linku  $l \in L_0$  jsou definovány náklady na zavedení provozu na této lince  $C_l$  a náklady  $c_l$ , což jsou náklady související s realizací jednoho spoje linky. K dispozici máme množinu druhů dopravních prostředků  $i$ , přičemž pro vozidlo  $i$ -tého druhu dopravního prostředku je známa jeho kapacita (u každého druhu dopravního prostředku je k dispozici pouze jeden typ vozidla z hlediska kapacity). Autoři zavádějí tři skupiny proměnných. Pro každou linku  $l \in L_0$  bude zavedena proměnná  $z_l$ , která bude nabývat dvou hodnot. Bude-li  $z_l = 0$ , linka  $l \in L_0$  nebude provozována, když  $z_l = 1$ , linka  $l \in L_0$  bude provozována. Pro každou linku  $l \in L_0$  autoři dále zavádějí nezápornou proměnnou  $f_l$ , reprezentující frekvenci spojů na dané lince. Poslední skupinou proměnných jsou nezáporné proměnné  $w_p$ , reprezentující tok cestujících na cestě  $p \in P$ .

Matematický model navržený autory má následující tvar:

$$\min \sum_{p \in P} w_p t_p + \sum_{l \in L_0} C_l x_l + \sum_{l \in L_0} c_l f_l \quad (4.6)$$

za podmíněk:

$$\sum_{p \in P_{st}} w_p = d_{st} \quad \text{pro } (s, t) \in D \quad (4.7)$$

$$\sum_{p \in P_a} w_p \leq \sum_{l \in L_a} k_l \cdot f_l \quad \text{pro } a \in A \quad (4.8)$$

$$\sum_{l \in L_a} f_l \leq \Lambda_a \quad \text{pro } a \in A \quad (4.9)$$

$$f_l \leq T \cdot z_l \quad \text{pro } l \in L_0 \quad (4.10)$$

$$z_l \in \{0, 1\} \quad \text{pro } l \in L_0 \quad (4.11)$$

$$f_l \geq 0 \quad \text{pro } l \in L_0 \quad (4.12)$$

$$w_p \geq 0 \quad \text{pro } p \in P \quad (4.13)$$

Funkce (4.6) reprezentuje účelovou funkci modelu, která se skládá ze tří členů. První člen reprezentuje celkovou dobu přepravy v dané síti. Zbývající dva členy představují náklady související s provozem linek. Druhý člen označuje náklady na zavedení linek a třetí člen náklady vyplývající z vlastního provozu. Omezující podmínky typu (4.7) zajistí, že toky cestujících na všech cestách z  $s$  do  $t$  budou odpovídat požadavku vyplývajícimu z OD matice mezi vrcholy  $s$  a  $t$ . Omezující podmínky typu (4.8) zajistí, že nabídka míst na každém úseku  $a \in A$  bude dostačující. Omezující podmínky typu (4.9) nám zajišťují, že počet spojů realizovaných na úseku  $a$  nepřekročí přípustné maximum (dané technickými možnostmi infrastruktury nebo jinak stanovené). Omezující podmínky typu (4.10) zajišťují provázanost mezi frekvencí spojů na dané lince  $f_l$  a bivalentní proměnnou  $z_l$ , určující zda linka bude v provozu či nikoliv. Díky této podmínce dojde k vyvolání nákladů na zavedení linky. Bude-li frekvence na příslušné lince nabývat kladné hodnoty, bude pro odpovídající proměnnou  $z_l$  platit  $z_l = 1$  a v účelové funkci dojde k vyvolání fixních nákladů souvisejících se zřízením linky. Hodnota pomocné konstanty  $T$  se volí například jako maximum z omezujících frekvencí stanovených pro jednotlivé úseky, tj.  $T = \max_{a \in A} \{\Lambda_a\}$ . Výrazy (4.11) - (4.13) představují obligatorní podmínky.

Navržený přístup se vyznačuje čtyřmi nevýhodami. První nevýhodou je, že při tomto přístupu bude nutno v případě výskytu velkého počtu cest zavést do modelu velký počet proměnných, které budou reprezentovat toky cestujících na jednotlivých cestách. Další nevýhodou je, že pokud jsou fixní a provozní náklady vysoké v porovnání s přepravními náklady cestujících, model může způsobit, že někteří cestující budou nuceni jet po dlouhých trasách a/nebo vícekrát přestupovat. Třetí nevýhodou je to, že nemůžeme modelovat dobu čekání, protože dopředu neznáme počet cestujících, kteří na jednotlivých zastávkách do jednotlivých spojů nastoupí, resp. přestoupí. Za poslední nevýhodu považujeme, že pomocí zavedených proměnných nedokážeme modelovat počet přestupů.

Z dostupné literatury je známo, že uvedeného přístupu bylo použito při návrhu sítě linek MHD v německém městě Postupim [3].

Další možné přístupy návrhu sítě linek MHD uvádí literatura [2].

### *Shrnutí*

V rámci shrnutí exaktních metod bude pozornost soustředěna na porovnání přístupů uvedených v dostupné literatuře. S ohledem na skutečnost, že informace týkající se některých přístupů byly poměrně kusé a prováděné a byl s nimi prováděn nevelký počet experimentů, není možné provést podrobnější srovnání. Ke srovnání proto byly použity: metoda zohledňující strategii cestování a maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích dopravní sítě.

### *Společné znaky uvedených metod*

Obě metody vycházejí z širší množiny linek, přičemž výsledná množina linek je podmnožinou širší množiny linek. Při vytváření širší množiny linek nejsou kladena žádná omezení, do širší množiny linek mohou být zahrnuty linky jak existující, tak linky nově uvažované. Metody pracují se vstupními údaji typu intenzita cestujících a kapacita disponibilního vozidlového parku. Obě metody byly úspěšně uvedeny do praxe, aplikace byly prováděny ve městech menší a střední velikosti.

### *Rozdíly uvedených metod*

Metoda zohledňující strategii cestování je heuristická a metoda maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích dopravní sítě je metodou exaktní. Optimalizační kritéria u uvedených metod jsou různá. Výstupem z metody zohledňující strategii cestování jsou počty vozidel přidělené jednotlivým linkám a výstupem metody maximalizující minimální z poměrných rezerv obsazenosti vozidel na úsecích dopravní sítě jsou výkonnosti jednotlivých linek, které je nutno následně přepočítat na počty vozidel (hodnota účelové funkce u výsledného řešení se tak může odchylovat od hodnoty účelové funkce získané řešením modelu).

## 5. TEORETICKÁ VÝCHODISKA ŘEŠENÍ

Při návrhu řešení bude navázáno na již vytvořené řešící postupy, založené zejména na metodách lineárního programování. Výhodou svědčící ve prospěch metod lineárního programování je zejména fakt, že metodami lineárního programování je možno řešit úlohy značných rozsahů, což je pro navrhování sítě linek charakteristické (velký počet proměnných a omezujících podmínek). Při použití metod lineárního programování lze také očekávat dosažení optimálního řešení, navíc je možno konstatovat, že v minulosti se již s úspěchem uvedené typy problémů pomocí lineárního programování řešily [16]. Lineární programování má dále k dispozici rozvinutou softwarovou podporu, což jeho široké využití v praxi ještě více umocňuje. V uvedené oblasti jsou navíc rozpracovány i metody vícekriteriální optimalizace, což je pro potřeby řešeného problému klíčové.

Z metod vícekriteriální optimalizace přicházejí v úvahu především metody založené na tzv. Čebyševově skalarizaci. V rámci Čebyševovy skalarizace se minimalizuje maximální vzdálenost kompromisního řešení od optimálních řešení získaných v rámci úloh jednokriteriální optimalizace podle jednotlivých kritérií zařazených v multikriteriálním modelu, to vše při zohlednění vah jednotlivých kritérií.

Na principu Čebyševovy skalarizace je založena i metoda STEM. Výhodou uvedené metody je jednoduchost jejího principu a pro podporu rovněž svědčí argument, že se jedná o interaktivní řešící metodu – výsledky mohou být v průběhu řešení korigovány expertem, což zvyšuje šance na jejich uplatnění v praxi [19].

Kromě popisu metody využitě pro potřeby vícekriteriální optimalizace bude v kapitole 5 pozornost věnována také matematickému modelování diskrétního výběru, protože pomocí něj může být analyzováno a predikováno rozhodování skupin cestujících (potenciálních zájemců) v situaci, kdy jsou nuceni zvolit jednu variantu z množiny navzájem se vylučujících variant. Na základě uvedeného typu rozdělení bude možno lépe zmapovat intenzity toků cestujících na jednotlivých hranách.

### 5.1 Princip vícekriteriální optimalizace na bázi metody STEM

V rámci optimalizačních výpočtů bude vícekriteriální optimalizace provedena pomocí metody STEM [19]. Metoda STEM (do češtiny volně přeloženo jako metoda kroků) spočívá ve střídání dvou základních kroků, výpočetního a rozhodovacího. Jak již bylo uvedeno, využívá metoda STEM při řešení Čebyševovu skalarizaci, která se uplatňuje

v rámci výpočetního kroku. Matematický model, ve kterém vystupuje  $n$  proměnných,  $m$  omezujících podmínek a  $k$  kritérií lze obecně zapsat ve tvaru:

$$\max f_i(x) = \sum_j^n c_{ij}x_j \quad \text{pro } i = 1, \dots, k \quad (5.1)$$

za podmínek:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \\ x_j &\geq 0 \text{ pro } j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (5.2)$$

Základem multikriteriální optimalizace pomocí metody STEM jsou modely jednokriteriální optimalizace, jejichž výsledky se následně vzájemně kombinují. Na počátku výpočtu řešitel - analytik sestaví kromě určení dílčích optim podle jednotlivých účelových funkcí také matici  $Y$ , přičemž hodnota  $y_{ij}$  reprezentuje hodnotu  $i$  - té účelové funkce při optimalizaci  $j$  - té účelové funkce. Na hlavní diagonále matice  $Y$  jsou tedy hodnoty optimálních řešení dosažených při jednokriteriálních optimalizacích podle jednotlivých optimalizačních kritérií uvedených v multikriteriálním modelu.

Následuje výpočet vah jednotlivých kritérií, který probíhá podle vztahů (5.3) a (5.4):

$$w_i = \frac{y_i^* - \min_j y_{ij}}{y_i^*} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{\sum_{j=1}^n c_{ij}^2}} \quad (5.3)$$

$$\text{kde se hodnota } \alpha \text{ volí tak, aby } \sum_{i=1}^k w_i = 1, \quad (5.4)$$

kde:

$k$  ... počet kritérií.

Nejdříve se vypočte hodnota koeficientu  $\alpha$  z rovnice:

$$\sum_i^k \frac{y_i^* - \min_j \{y_{ij}\}}{y_i^*} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{\sum_{j=1}^n c_{ij}^2}} = 1 \quad (5.5)$$

Po stanovení vah lze multikriteriální problém převést na jednokriteriální tak, že se hledá řešení, pro které budou hodnoty vážených odchylek jednotlivých účelových funkcí od hodnot optimálních řešení jednokriteriálních optimalizačních úloh (podle optimalizačních kritérií zařazených v multikriteriálním modelu) co nejmenší, což je právě již výše zmiňovaný princip Čebyševovy skalarizace. Princip Čebyševovy skalarizace je v obecném tvaru reprezentován následujícím modelem (5.6) – (5.9):

$$\min f(d) = d \quad (5.6)$$

za podmínek:

$$d \geq w_i \left( y_i^* - \sum_{j=1}^n c_{ij} x_j \right) \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, k \quad (5.7)$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{pro } j = 1, \dots, n \quad (5.8)$$

$$d \geq 0 \quad (5.9)$$

kde:

$y_i^*$  ... hodnota účelové funkce při optimálním řešení podle kritéria  $i = 1, \dots, k$ ,

$w_i$  ... váha odchylky  $i$ -té účelové funkce od optimální hodnoty [-],

$d$  ... proměnná omezující váženou vzdálenost hodnot účelových funkcí řešení od ideálních hodnot,

$c_{ij}$  ... koeficient proměnné  $x_j, j = 1, \dots, n$  v účelové funkci  $i, i = 1, 2, \dots, n$ .

Výraz (5.6) reprezentuje účelovou funkci, prostřednictvím omezujících podmínek typu (5.7) se omezuje vzdálenost daného kompromisního řešení od optimálního řešení podle  $i$ -té kritériální funkce proměnnou  $d$  shora, omezující podmínky typu (5.8) a (5.9) jsou obligatorními podmínkami.

Ve výpočetním kroku řešitel - analytik vyřeší model (5.6) – (5.9), čímž získá průběžné řešení a předloží rozhodovateli hodnoty účelových funkcí získaných v rámci průběžného řešení. V rozhodovacím kroku rozhodovatel - expert posoudí dosažené hodnoty a předá řešiteli - analytikovi informaci, hodnoty kterých účelových funkcí mu vyhovují, a hodnoty možných změn těchto kritérií umožňujících změny hodnot kritérií, které mu nevyhovují. Možnost změny hodnoty některé z vyhovujících hodnot účelových funkcí je totiž nutným předpokladem pro změnu hodnot těch účelových funkcí, jejichž hodnoty rozhodovateli nevyhovují. Pakliže hodnoty všech optimalizačních kritérií rozhodovateli vyhovují,

výpočet končí, dosažené kompromisní řešení je považováno za optimální [19]. V opačném případě se váhy jednotlivých kritérií upraví a celý výpočetní krok se opakuje do té doby, dokud nedojde ke schválení všech vypočítaných hodnot rozhodovatelem nebo zjištění, že kompromisní řešení mezi jednotlivými kritérii neexistuje.

## **5.2 Matematické modelování diskrétního výběru**

Potenciální uživatelé MHD mají zpravidla při plánování svých cest možnost výběru konkrétní trasy (resp. dopravního spojení). Je logické, že se jednotlivé varianty při volbě spojení vzájemně vylučují. Proces výběru, při kterém se jednotlivé varianty vylučují, nazýváme obecně diskrétním výběrem. Účelem modelování diskrétního výběru je určit, jaký vliv mají charakteristické vlastnosti jednotlivých variant na jejich volbu potenciálními uživateli.

Důležitým cílem v této souvislosti je identifikovat, které z charakteristických vlastností variant jsou pro uvažovanou skupinu potenciálních uživatelů důležité, a na základě nich navrhnout opatření mající za následek cílené změny v jejich chování, které jsou v souladu s obecně prospěšnými zájmy.

Není možno vytvářet modely chování, bez toho aniž by proběhlo pozorování skupiny potenciálních uživatelů. Při identifikaci charakteristických vlastností variant zpravidla není přesně znám mechanismus, podle kterého se potenciální uživatel při výběru varianty rozhoduje, lze však předpokládat, že proces jeho rozhodování bude probíhat v následujících konturách:

1. potenciální uživatel určí přípustné varianty,
2. vyhodnotí všechny charakteristické vlastnosti daných variant důležité z jeho pohledu,
3. podle jím definovaných pravidel se rozhodne pro výběr jedné varianty z množiny přípustných.

V některých případech si potenciální uživatelé mohou zvolit konkrétní variantu i bez toho, aniž by podstoupili výše uvedený strukturovaný proces.

V následujícím textu budou popsány čtyři atributy rozhodovacího procesu, kterými jsou: uživatel, varianty, charakteristické vlastnosti a rozhodovací pravidlo.

- **Uživatel**

Za uživatele může být považován jednotlivec či skupina lidí. Společným znakem je především to, že různí uživatelé se nacházejí v různých situacích a mají různé priority (různě oceňují hodnoty charakteristických vlastností jednotlivých variant).

- **Varianty**

Potenciální uživatelé si vytvářejí množiny variant, které jsou pro ně akceptovatelné. Varianty mohou být omezeny prostředím a charakteristikami jednotlivce.

- **Charakteristické vlastnosti variant**

Varianty jsou ve výběrovém procesu charakterizovány množinou vlastností (atributů). Přitažlivost jednotlivých variant je určena hodnotou jejich charakteristických vlastností. Charakteristické vlastnosti mohou být společné pro všechny varianty nebo mohou být pro některé varianty specifické. Významným důvodem pro vývoj rozhodovacích modelů je určit strategii, která by při změně charakteristických vlastností změnila chování uživatelů. Je důležité identifikovat a do modelu zahrnout ty vlastnosti, které lze změnit strategickými opatřeními.

- **Rozhodovací pravidlo**

Bude předpokládáno, že si uživatel vybere takovou variantu, která mu přinese co nejvyšší užitek. Pravidlo maximalizace užitku je založeno na dvou základních konceptech. Za prvé, vektor vlastností charakterizujících každou variantu se dá redukovat na skalární hodnotu pro danou variantu. Ze tří charakteristických vlastností je vybrána jedna a následně jsou varianty seřazeny. Postup je založený na předpokladu, v němž uživatel hledá kompromis mezi charakteristickými vlastnostmi. Můžeme předpokládat, že cestující si vybere dražší způsob dopravy, pokud úspora času nabízená daným způsobem dopravy bude kompenzovat zvýšenou cenu jízdného. Druhý předpoklad je, že si uživatel vybere variantu s nejvyšším užitekem. Z různých možností bude vybrána varianta s nejvyšší hodnotou

### **5.2.1 Teorie užitku**

Pravidlo maximalizace užitku předpokládá, že existuje funkce obsahující charakteristické vlastnosti variant a charakteristiky uživatelů, jejíž hodnota udává užitečnost každé varianty pro uživatele. Uživatel si vybere variantu, ze které má větší užitek než z jiných variant. Přitom se předpokládá, že množina variant se dá uspořádat



podle užitku a potom se dá určit nejlepší varianta. Přitom není důležitá absolutní hodnota užitku, ale jen rozdíl mezi dvěma variantami konkrétně jestli je tento rozdíl kladný nebo záporný. Jakákoliv funkce, která vygeneruje stejné pořadí variant, se může použít jako funkce užitku. Jinými slovy, funkce užitku, které dají stejné pořadí variant, jsou ekvivalentní.

Pokud při aplikaci tohoto rozhodovacího pravidla maximalizujícího užitek nepřipustíme žádnou nejistotu. Tj. předpokládáme, že uživatel si určitě vybere nejcennější variantu, dostáváme deterministický model užitku. Tento přístup má však několik nedostatků. Za prvé, uživatel může mít neúplnou nebo nepřesnou informaci o charakteristických vlastnostech některé nebo všech alternativ. Potom různí uživatelé, kteří mají různé informace o variantách, pravděpodobně vykonají různý výběr. Za druhé, analytik (ten kdo sestavuje model) má jiné nebo neúplné informace o charakteristických vlastnostech v porovnání s uživatelem a taktéž na výpočet užitku nemůže používat jinou funkci než uživatel. Za třetí, analytik pravděpodobně nezná specifické okolnosti, za kterých se uživatel rozhoduje. Například cestující si může zvolit způsob dopravy v závislosti na počasí v daný den, pravidelný cestující může z různých důvodů cestu vynechat apod. Modely, které zahrnují tuto nedostatečnou znalost uživatele rozhodovacího procesu, se nazývají pravděpodobnostní modely užitku a teorie k nim sestavená pravděpodobnostní teorie výběru.

V pravděpodobnostní teorii model vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou si uživatel vybere každou variantu, a ne určitost. Funkce užitku je zde rozdělená na dva členy. První člen reprezentuje tu část užitku, kterou analytik zná, může pozorovat a měřit (často nazývaná deterministická nebo pozorovatelná část užitku). Druhý člen reprezentuje tu část užitku, kterou analytik nezná. Tento chybový člen vyjadřuje skutečnost, že analytik není schopen měřit nebo specifikovat všechny charakteristické vlastnosti, které ovlivňují hodnotu užitku přiřazenou dané variantě uživatelem. Formálně můžeme funkci užitku z varianty  $i$  pro uživatele  $k$  vyjádřit takto:

$$U_{ik} = V_{ik} + \varepsilon_{ik} \quad (5.10)$$

kde  $V_{ik}$  je deterministická (pozorovatelná) část užitku a  $\varepsilon_{ik}$  je chybový člen (náhodná proměnná, která reprezentuje tu část užitku, kterou analytik nezná).

Deterministická část užitku je matematickou funkcí proměnných (vlastností variant a charakteristik uživatele) a parametrů, které je třeba odhadnout. Kvůli jednoduchosti se tato funkce nejčastěji formuluje jako aditivní funkce. Můžeme ji rozdělit na tři části:

- část závislou pouze na vlastnostech variant,
- část závislou jen na charakteristikách uživatele,
- část, která reprezentuje interakci mezi atributy a charakteristikami.

Formálně můžeme deterministickou část funkce užitku vyjádřit jako:

$$V_{ik} = V(\mathbf{X}_i) + V(\mathbf{S}_k) + V(\mathbf{S}_k, \mathbf{X}_i) \quad (5.11)$$

kde  $\mathbf{X}_i$  je vektor atributů popisujících alternativu  $i$  a  $\mathbf{S}_k$  je vektor charakteristik popisující uživatele  $k$ .

Funkce  $V(\mathbf{X}_i)$  je váženou sumou atributů alternativy  $i$ :

$$V(\mathbf{X}_i) = \gamma_1 X_{i1} + \gamma_2 X_{i2} + \dots \quad (5.12)$$

kde  $X_{ij}$  je hodnota charakteristické vlastnosti  $j$  varianty  $i$  a  $\gamma_j$  je parametr, který vyjadřuje směr ovlivnění a důležitost charakteristické vlastnosti  $j$  na užitek. Parametr  $\gamma_j$  nezávisí od alternativy, tj. je stejný pro všechny alternativy, ve kterých atribut  $j$  vystupuje. Například za atributy způsobu dopravy  $i$  můžeme považovat dobu přepravy  $t_i$ , cenu  $c_i$  a u veřejné dopravy frekvenci spojů  $f_i$ . Potom deterministická funkce užitku závislá jen na charakteristických vlastnostech bude pro způsob dopravy  $i$ :

$$V(\mathbf{X}_i) = \gamma_1 t_i + \gamma_2 c_i + \gamma_3 f_i \quad (5.13)$$

Parametry  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$  budou záporné, protože užitek je nepřímo úměrný času a ceně dopravy (čím delší doba přepravy, tím se daný způsob považuje za nevýhodnější). Podobný tvar bude mít ta část deterministické funkce užitku, která závisí na charakteristikách uživatele. V případě volby způsobu dopravy se obvykle za relevantní charakteristiky považují příjem domácnosti, věk cestujícího, počet ekonomicky aktivních lidí v domácnosti, vlastnictví automobilu. Část funkce, která vyjadřuje interakci mezi atributy variant a charakteristikami uživatele, odrážejí rozdíl ve vnímání různých atributů různými uživateli. Například pro cestující s vyšším příjmem zřejmě bude cena dopravy méně důležitá než pro občany s průměrným příjmem. Tuto skutečnost můžeme vyjádřit

tak, že cenu dopravy pro daný způsob dopravy podělíme ročním příjmem domácnosti daného cestujícího.

Náhodná proměnná  $\varepsilon_{ik}$  může mít různá rozdělení pravděpodobnosti. Když předpokládáme, že tento chybový člen pro každou alternativu je součtem velkého počtu náhodných vlivů, potom podle centrální limitní věty má normální rozdělení pravděpodobnosti. Tento předpoklad vede k sestavení pravděpodobnostního modelu výběru s názvem Multinomial Probit Model. Matematická složitost tohoto modelu však byla překážkou pro jeho použití v praxi. Pokud předpokládáme, že náhodné vlivy nejsou významné v tom smyslu, že velmi nezmění hodnotu užitku z dané varianty, tak namísto normálního rozdělení můžeme použít Gumbelovo rozdělení pravděpodobnosti, které se podobá normálnímu rozdělení, ale má výhodu v tom, že jeho distribuční funkce se dá vyjádřit v uzavřené formě (vzorcem). Předpoklad extrémně malých hodnot velkého počtu náhodných veličin spolu s předpokladem, že náhodné veličiny  $e_{ik}$  pro různé alternativy a různé uživatele jsou nezávislé a mají stejnou střední hodnotu a rozptyl vedly k formulování pravděpodobnostního modelu výběru s názvem Multinomial Logit Model.

### 5.2.2 Multinomial Logit Model

Dle výše uvedených předpokladů je pravděpodobnost, že si uživatel  $k$  vybere možnost  $a$  z množiny variant  $A$  vyjádřena takto:

$$P_k(a) = \frac{e^{V_{ak}}}{\sum_{i \in A} e^{V_{ik}}} \quad (5.14)$$

kde  $V_{ik}$  je deterministická část funkce užitku z varianty  $i$  pro uživatele  $k$ . Vybereme-li skupinu uživatelů se stejnými charakteristikami, pak v symbolu pro pravděpodobnost můžeme vynechat index  $k$  a počet uživatelů z této skupiny, kteří si vyberou variantu  $a$ , bude

$$N(a) = N \cdot P(a) \quad (5.15)$$

kde  $N$  představuje celkový počet uživatelů ve skupině.

Nevýhodou modelu Multinomial Logit je předpoklad nezávislosti variant, který říká, že pro každého uživatele je poměr pravděpodobností výběru dvou variant nezávislý na přítomnosti nebo charakteristické vlastnosti nějaké jiné varianty, tj. ostatní varianty neovlivní rozhodnutí o výběru mezi dvěma uvažovanými variantami.

## **6. NÁVRH ŘEŠENÍ PROBLÉMU OPTIMALIZACE SÍTĚ LINEK MHD**

### **6.1 Stručná charakteristika navrženého postupu**

Obecně je možno plánování veřejné hromadné dopravy považovat za rozhodovací proces, složený z pěti fází [4]:

1. návrh prostorového plánu (trasování) linek,
2. volba frekvence linek,
3. sestava jízdního řádů,
4. sestava oběhů vozidel,
5. sestava turnusů řidičů.

V předložené práci je pozornost věnována prvním dvěma oblastem, které je možno považovat za návrh sítě linek.

Úloha bude formulována jako vícekritériální optimalizační problém a modelována pomocí prostředků matematického programování. Metoda řešení kombinuje exaktní algoritmus pro řešení matematického modelu s heuristickým přístupem, prostřednictvím kterého budou výsledky matematického modelu korigovány podle předpokládaného chování cestujících.

### **6.2 Návrh multikritériálního matematického modelu pro nalezení výchozího řešení**

Při návrhu multikritériálního matematického modelu je třeba se zabývat následujícím problémem. Je známa poptávka cestujících veřejnosti o přepravní službu vyjádřená OD maticí. OD matice je čtvercová, jednotlivé řádky a sloupce představují zastávky v síti. Prvek OD matice představuje velikost přepravního toku mezi zastávkami, tj. počet cestujících za časovou jednotku, kteří chtějí cestovat z výchozí zastávky (odpovídající příslušnému řádku matice) do zastávky cílové (odpovídající příslušnému sloupci). K dispozici je vytvořena širší množina linek, do které jsou zahrnuty jak v současnosti provozované linky, tak i modifikované linky (které se například vyhýbají přetíženým úsekům dopravní sítě), případně linky nové, které mohou představovat další varianty tras používaných cestujícími, např. nejkratší cesty pro nejsilnější proudy cestujících nebo trasy vytvořené na základě jiných kritérií. Úkolem je určit, které linky ze širší množiny linek

budou provozovány a stanovit jejich frekvence takovým způsobem, aby kvalita dopravy byla co nejvyšší a náklady dopravce co nejnižší.

V následujícím textu bude věnována pozornost v úvahu přicházejícím optimalizačním kritériím.

Prvním z kritérií je kvalita dopravy z pohledu cestujících veřejnosti. Pro většinu cestujících jsou nejdůležitějšími charakteristickými vlastnostmi dopravní služby zejména doba přepravy, cena za přepravu, pohodlí. Při navrhování sítě linek městské hromadné dopravy vycházíme ze dvou předpokladů, a to:

- nebereme v úvahu cenu jízdného, protože předpokládáme fixní zájem o využívání veřejné dopravy (je znám počet cestujících, kteří se rozhodli využít veřejnou dopravu, a je počítáno pouze s těmito cestujícími),
- cena jízdného je na všech trasách stejná.

Z uvedených předpokladů tedy vyplývá, že při návrhu tras a frekvencí linek lze cenu jízdného zanedbat a pozornost věnovat pouze kritériím pohodlí a doba přepravy. Pokud se dopravní proudy vztahují k zastávkám MHD, potom doba cestování se skládá ze tří složek:

1. doba jízdy ve vozidle,
2. doba čekání na výchozí zastávce,
3. doba čekání při přestupech.

Doba jízdy ve vozidle závisí na trasách linek, které cestující využívá. Doba čekání jak na výchozí zastávce (za předpokladu příchodu cestujících na zastávku bez znalosti jízdního řádu), tak na přestupních zastávkách je nepřímě úměrná frekvenci linek, což však činí matematický model modelem nelineárním.

Z výše uvedených důvodů bude skupina hledisek preferovaných cestujícími reprezentována celkovou dobou jízdy cestujících a pohodlím.

Druhým kritériem při návrhu sítě linek MHD je efektivita poskytované služby, kterou představují investiční a provozní náklady dopravce. Protože náklady souvisejícími s provozováním dopravního parku a technické základny, na základě kterých by bylo možno kvantifikovat jednotlivé skupiny investičních nákladů, není reálné získat, nebudou investiční náklady v navrženém modelu plnit funkci optimalizačního kritéria, ale pouze reálného omezení, tj. omezující podmínky, která zabezpečí dopravní obsluhu v rámci

disponibilního vozidlového parku. Funkci optimalizačního kritéria tak budou plnit pouze provozní náklady přímo související s délkou navržených tras a frekvencí linek, vyjádřené např. veličinou naturálního charakteru - dopravním výkonem vyjádřeným počtem kilometrů, které ujedou všechna vozidla nasazená k obsluze vybraných linek.

Třetím definovaným kritériem je skupina negativních dopadů veřejné dopravy na životní prostředí, v navrženém modelu bude skupina reprezentována dopady z hlediska znečištění ovzduší [47].

Je definována dopravní síť modelovaná pomocí digrafu  $G = (N, A, t)$ . Množina  $N$  představuje množinu uzlů (zastávek) a množina  $A$  představuje množinu úseků dopravní sítě (ulic, na nichž lze provozovat trasy linek). Pro každý úsek  $a \in A$  je známa cestovní doba  $t_a$ . Předpokládáme, že tato doba není závislá na druhu dopravního prostředku, na jeho obsazenosti, na intenzitě proudu cestujících na úseku  $a$  ani na časovém horizontu, ve kterém sestavujeme plán. Vektor časových vzdáleností označíme  $\mathbf{t}$ . Dále je pro každou dvojici uzlů  $(r, s) \in N$  známa intenzita cestujících, kteří chtějí cestovat v posuzovaném časovém horizontu z výchozí zastávky  $r$  do cílové zastávky  $s$ . Hodnoty intenzit cestujících jsou uspořádány do matice  $\mathbf{P} = \{p^{rs}\}$ . Množina všech dvojic  $(r, s)$  je označována symbolem  $Q$ .

Do sítě linek můžeme nasadit různé dopravní prostředky, množinu druhů dopravních prostředků označíme  $I$ . Pro každý druh dopravního prostředku  $i \in I$  známe množinu typů vozidel  $J_i$ . Označme  $n_{ij}$  počet disponibilních vozidel druhu dopravního prostředku  $i \in I$  a typu  $j \in J_i$  a  $k_{ij}$  jejich kapacitu. Vozidla jednotlivých druhů a typů se kromě kapacity od sebe liší objemem vyprodukovaných emisí z pohonných jednotek, provozními a investičními náklady. V kontextu produkovaných emisí bude uvažováno pouze s jedním typem znečišťující látky - oxidem uhelnatým CO. Typ autobusu může být také specifikován pohonem, kterým může být vznětový motor, který jako palivo používá naftu nebo motor na stlačený zemní plyn (CNG). Symbol  $e_{lij}$  označuje množství CO (uvedeného v gramech na kilometr), který vyprodukuje vozidlo druhu dopravního prostředku  $i \in I$  a typu  $j \in J_i$  na lince  $l \in L$ .

Nechť  $L$  představuje počáteční množinu přípustných linek. Linka  $l \in L$  je charakterizována délkou trasy  $d_l$ , maximální přípustnou frekvencí (maximální počet spojů

za hodinu)  $f_l^{\max}$  a dobou oběhu  $t_l^{\text{turn}}$ , což je doba potřebná k obsluze linky  $l$ . Označme  $L_a$  množinu linek, které procházejí úsekem  $a \in A$ ,  $A_v^+$  množinu úseků vystupujících z uzlu  $v$  a  $A_v^-$  množinu úseků vstupujících do uzlu  $v$ .

Cílem je rozhodnout, které z linek z množiny  $L$  budou v provozu a stanovit frekvence jejich spojů tak, aby se dosáhlo co nejvyšší přepravní nabídky, nejvyšší ekonomické efektivity pro dopravce a co nejnižšího negativního dopadu MHD na životní prostředí.

Návrh multikriteriálního lineárního modelu vychází z přístupů, který byl navržen v minulosti v literatuře [3], kde jsou optimální trasy cestujících nastaveny během procesu řešení, tj. přiřazení cestujících na úseky sítě není vstupním parametrem modelu, ale stává se rozhodnutím. Toto rozhodnutí je zastoupeno proměnnými  $y_a^{rs} \in R_0^+$ , které určují, kolik cestujících z  $r$  do  $s$  projde přes úsek  $a$  (tzn. když bude  $y_a^{rs} = 0$ , bude to znamenat, že úsekem  $a$  nepovede trasa žádného cestujícího vstupujícího do systému MHD ve vrcholu  $r$  a opouštějícího systém MHD ve vrcholu  $s$ ). Celková doba pobytu ve vozidle všech cestujících z  $r$  do  $s$  je vyjádřena následující vzorcem:

$$\sum_{a \in A} t_a y_a^{rs} \quad (6.1)$$

Nicméně, dobu čekání nelze modelovat, protože předem nevíme, jaký bude počet cestujících, kteří nastoupí nebo přestoupí na jednotlivých zastávkách.

Rozhodnutí o počtu vozidel přidělených lince  $l \in L$  a frekvencích spojů na této lince se budou modelovat pomocí celočíselných proměnných  $x_{lij}$ , které vyjadřují, kolik vozidel druhu dopravního prostředku  $i \in I$ , typu vozidla  $j \in J_i$  bude nasazeno na linku  $l \in L$ . Linka, které nebude v optimálním řešení přiřazeno žádné vozidlo (tj.  $x_{lij} = 0$  pro všechny  $i \in I$ ,  $j \in J_i$ ), nebude provozována, linka s kladným počtem přiřazených vozidel bude ve výsledném řešení provozována.

Problém stanovení frekvencí spojů na jednotlivých linkách je řešen následně: frekvence spojů na linkách se odvodí z oběžné doby linek a počtu přidělených vozidel podle vzorce:

$$f_l = \frac{1}{t_l^{\text{turn}}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} x_{lij} \quad (6.2)$$

Protože se ve skutečném provozu předpokládá použití pouze jednoho typu vozidla na lince [37], zavedou se do modelu bivalentní proměnné, označované například  $z_{li}$ , přičemž když  $z_{li} = 0$ , linka  $l \in L$  nebude obsluhována druhem dopravního prostředku  $i \in I$ , když  $z_{li} = 1$ , linka  $l \in L$  bude obsluhována druhem dopravního prostředku  $i \in I$ . Uvažujme, že jsme v situaci, kdy na linku můžeme nasadit libovolný druh dopravního prostředku.

Multikriteriální matematický model, který umožní minimalizovat dobu cestování, přepravní výkon a objem CO má následující tvar:

$$\text{Minimalizuj } \sum_{(r,s) \in Q} \sum_{a \in A} t_a y_a^{rs} \quad (6.3)$$

$$\text{Minimalizuj } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{l \in L} d_l x_{lij} \quad (6.4)$$

$$\text{Minimalizuj } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{l \in L} d_l e_{lij} x_{lij} \quad (6.5)$$

za podmínek:

$$\sum_{l \in L_a} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \frac{1}{t_l^{turn}} x_{lij} k_{ij} \geq \sum_{(r,s) \in Q} y_a^{rs} \quad \text{pro } a \in A \quad (6.6)$$

$$\sum_{a \in A_r^+} y_a^{rs} = p^{rs} \quad \text{pro } (r, s) \in Q \quad (6.7)$$

$$\sum_{a \in A_s^-} y_a^{rs} = p^{rs} \quad \text{pro } (r, s) \in Q \quad (6.8)$$

$$\sum_{a \in A_v^-} y_a^{rs} = \sum_{a \in A_v^+} y_a^{rs} \quad \text{pro } (r, s) \in Q, v \in N, v \neq r, v \neq s \quad (6.9)$$

$$\sum_{i \in I} z_{li} \leq 1 \quad \text{pro } l \in L \quad (6.10)$$

$$\sum_{j \in J_i} x_{lij} \leq M z_{li} \quad \text{pro } l \in L, i \in I \quad (6.11)$$

$$\sum_{l \in L} x_{lij} \leq n_{ij} \quad \text{pro } i \in I, j \in J_i \quad (6.12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \frac{1}{t_l^{turn}} x_{lij} \leq f_l^{\max} \quad \text{pro } l \in L \quad (6.13)$$



$$y_a^{rs} \geq 0 \quad \text{pro } (r, s) \in Q, a \in A \quad (6.14)$$

$$x_{lij} \in Z_0^+ \quad \text{pro } l \in L, i \in I, j \in J_i \quad (6.15)$$

$$z_{li} \in \{0,1\} \quad \text{pro } l \in L, i \in I \quad (6.16)$$

Výraz (6.3) je účelová funkce modelu, která reprezentuje celkovou dobu pobytu všech cestujících v dopravních prostředcích. Výraz (6.4) je další účelová funkce modelu, která vyjadřuje dopravní výkon všech vozidel při absolvování tras linek. Účelová funkce (6.5) modeluje celkový objem vyprodukovaných emisí při obsluze linek všemi vozidly. Omezující podmínky typu (6.6) zajišťují, že celkový počet cestujících na úseku  $a$  nepřekročí kapacitu vozidel, které nabízejí místa na daném úseku za sledované období. Omezující podmínky typu (6.7) a (6.8) zajišťují, že cestovní poptávka bude uspokojena. Omezení (6.9) zajišťují kontinuitu toku v uzlech dopravní sítě. Omezení (6.10) a (6.11) zajišťují, že bude-li linka v provozu, bude obsluhována právě jedním druhem dopravních prostředků. Za konstantu  $M$  dosazujeme dostatečně velké kladné číslo, které neomezuje počet vozidel druhu  $i \in I$  přiřazeného lince  $l \in L$ . Omezující podmínky typu (6.12) zajišťují, že počet vozidel přidělených na jednotlivé linky nepřekročí kapacitu vozidlového parku. Omezující podmínky typu (6.13) zajišťují, že počet spojů provozovaných na lince  $l$  nepřekročí maximální přípustný počet spojů definovaných v zadání. Zbývající omezující podmínky typu (6.14) - (6.16) jsou podmínkami obligatorními, které uvádějí definiční obory proměnných vystupujících v úloze.

### 6.3 Nový algoritmus pro návrh sítě linek MHD

Postup zvolený pro řešení problému návrhu sítě linek navazuje na přístup publikovaný v minulosti autory Fanem a Machemehlem [18]. Analogicky, jako v případě jejich přístupu, bude prvním krokem inicializační krok, ve kterém bude navržena širší množina linek.

V druhé fázi bude pomocí metody STEM vyřešen model (6.3) – (6.16). Pro linky, kterým bude přidělen kladný počet vozidel ( $x_{lij} > 0$ ) se vypočítají frekvence.

Hodnoty proměnných  $y_a^{rs}$  budou udávat velikosti toků cestujících na jednotlivých úsecích z přepravního proudu z  $r$  do  $s$  (tzn. když bude  $y_a^{rs} = 0$ , bude to znamenat, že

úsekem  $a \in A$  nepovede trasa žádného cestujícího vstupujícího do systému MHD ve vrcholu  $r$  a opouštějícího systém MHD ve vrcholu  $s$ ). Protože optimální řešení modelu je ve vícekritériálním programování principiálně kompromisní, nemusí být (a zpravidla ani nebude) optimální z pohledu cestujících. Uvedená situace bude nastávat zejména tehdy, budou-li někteří cestující při získaném kompromisním řešení nuceni použít buď velmi dlouhé trasy anebo trasy s velkým počtem přestupů.

Existují-li v získaném řešení mezi uzly  $r$  a  $s$  alternativní cesty, dá se předpokládat, že někteří cestující tyto cesty využijí. Půjde například o situace, kdy mezi uzly  $r$  a  $s$  je sice vedená přímá linka, ale cestovní doba je příliš dlouhá, mohou se tedy najít cestující, kteří budou preferovat kratší cestu z pohledu cestovní doby, ale s přestupováním.

V této fázi řešení se uplatní iterační proces, ve kterém bude střídavě docházet ke změnám tras původních přepravních proudů (s využitím modelu diskrétního výběru) a navazujícím úpravám frekvencí jednotlivých linek. Úpravy frekvencí budou prováděny pomocí zjednodušeného matematického modelu. Výsledkem řešení zjednodušeného modelu však už není, jakým způsobem budou cestující v síti linek MHD cestovat, ale na základě intenzit se na úsecích pouze vypočítá nová frekvence linek. Zjednodušený model, na rozdíl od modelu původního, neobsahuje proměnné  $y$ , účelovou funkci (6.3) a podmínky (6.7) – (6.9) a (6.14), změní se podmínky (6.6), které budou mít následující tvar:

$$\sum_{l \in L_a} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \frac{1}{t_l^{turn}} x_{lij} k_{ij} \geq q_a u \quad \text{pro } a \in A \quad (6.17)$$

kde  $q_a$  představuje celkový tok cestujících na úseku  $a \in A$  a proměnná  $u$  minimální z poměrných rezerv mezi počtem nabízených míst a průměrně požadovaným počtem míst na jednotlivých úsecích, pro kterou platí:

$$u \geq 0 \quad (6.18)$$

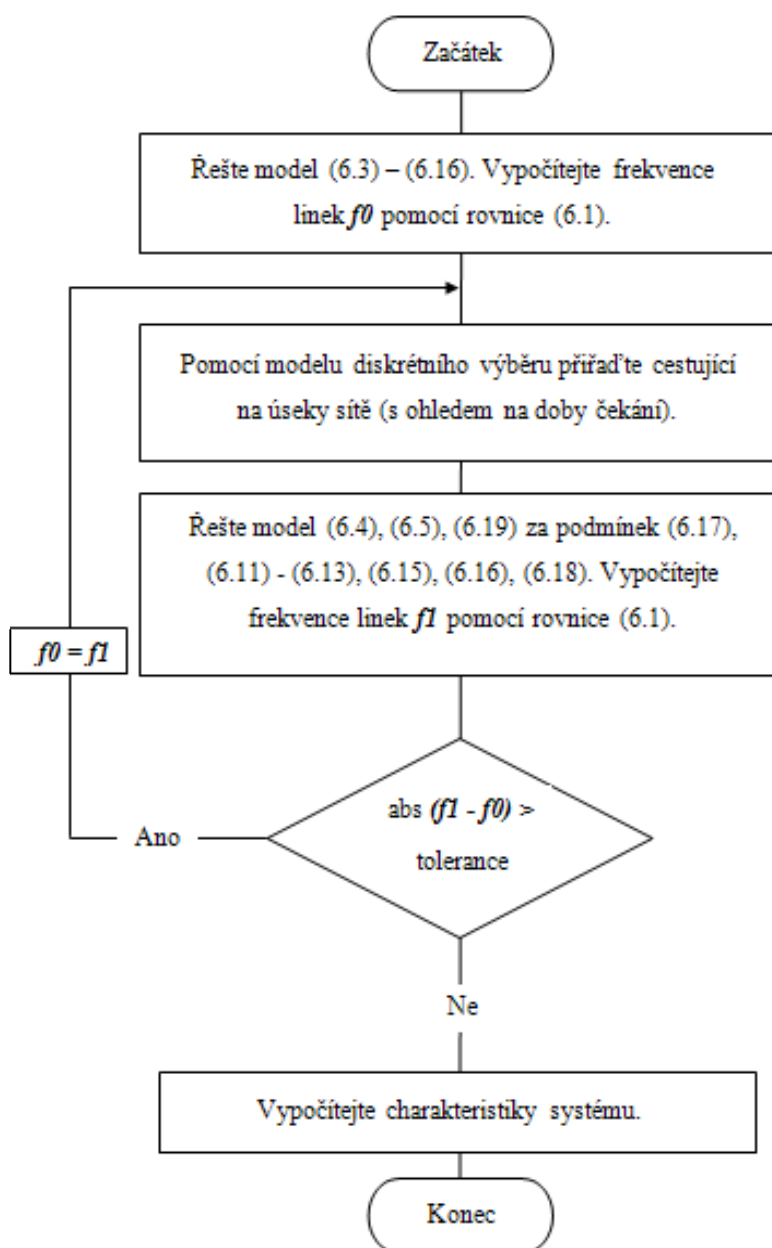
K účelovým funkcím (6.4) a (6.5) přidáme novou účelovou funkci:

$$\text{Maximalizujte } u \quad (6.19)$$

Po vyřešení zjednodušeného modelu se nově získané frekvence linek porovnají s frekvencemi vypočítanými v předchozím kroku.

Budou-li se obě frekvence lišit o více, než je zvolená tolerance, následuje návrat k prvnímu kroku iteračního procesu (modelu chování cestujících) a celý proces se opakuje, dokud rozdíl mezi výsledky dvou po sobě jdoucích iterací nebude pokryt tolerancí v určené výši. Velikost uvedené tolerance stanoví řešitel, příp. se stanoví na základě expertního odhadu, např. podle literatury [18] se doporučuje stanovit toleranci ve výši 10%. Zajímavým teoretickým problémem může být výzkum konvergence algoritmu k nulové toleranci, čemuž bude věnována pozornost v rámci experimentální části disertační práce.

Postup řešení je možno také zobrazit graficky pomocí vývojového diagramu – viz. obrázek č. 1.



Obrázek č. 1 Vývojový diagram

### 6.3.1 Metoda pro přidělení cestujících na úseky sítě linek

V dalším textu bude podrobněji popsána metoda pro přidělení cestujících na úseky sítě. Metoda využívá multinomial logit model (popsaný v kapitole 5.2) pro modelování rozhodování cestujících majících při cestování z uzlu  $r$  do uzlu  $s$  k dispozici více cest (dopravních spojení).

Pro každou takovouto dvojici uzlů  $(r, s)$  vyhledáme všechny přípustné cesty. Za přípustnou se bude považovat cesta splňující následující podmínky:

1. cesta je přímá bez přestupů, nebo obsahuje nanejvýš definovaný počet přestupů,
2. cestovní doba po této cestě nepřekročí minimální cestovní dobu o více než je stanovená hodnota (pro potřeby práce je uvažováno s hodnotou 30%).

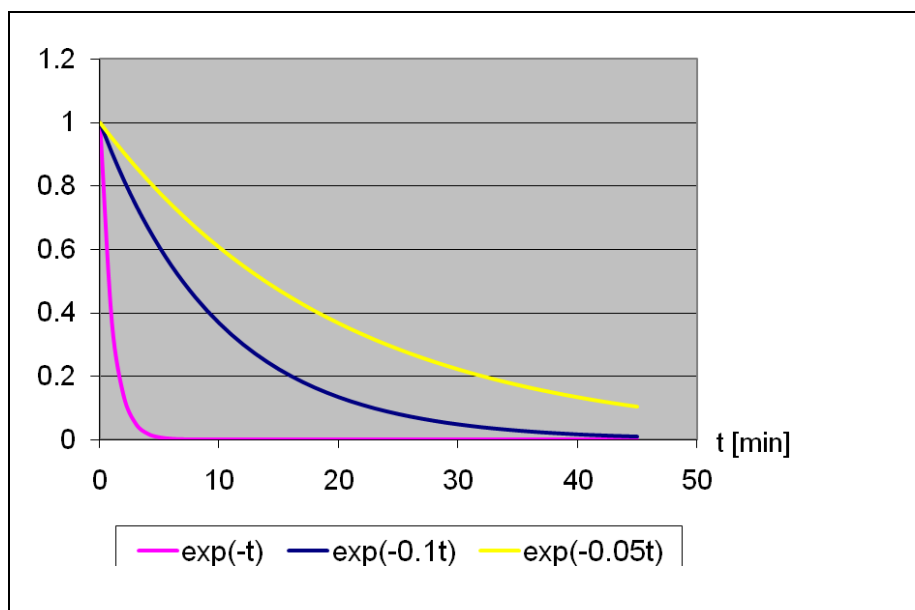
Protože cestovní doba v sobě obsahuje i dobu čekání na zastávkách, je nutno stanovit pravidla, podle kterých bude uvedená doba vypočítána. Způsob výpočtu bude záviset na délce intervalu mezi spoji. Pokud bude interval mezi spoji, označený například  $\tau$  (vyjádřeno v minutách) kratší než 10 minut, bude se za průměrnou dobu čekání na výchozí zastávce považovat doba  $\frac{\tau}{2}$  [11]. V ostatních případech bude vycházeno z literatury [18], ve které se průměrná doba čekání cestujícího aproximuje výrazem  $2 + 0,3 \cdot \tau$ . Při přestupech je vždy doba čekání  $\frac{\tau}{2}$ .

Pro výpočet počtu cestujících po každé z přípustných cest je možno použít přístup založený na užitkových funkcích. V rámci tohoto přístupu se výběr cesty cestujícího uskuteční s pravděpodobností, záviselou na užitku, který mu výběr dané cesty přinese. V MHD můžeme předpokládat, že všechny cesty se stejnou výchozí a cílovou zastávkou mají stejnou cenu. Deterministická část funkce užitku je tedy tvořena pouze dobou cestování. Označme symbolem  $K(r, s)$  množinu všech přípustných cest z  $r$  do  $s$  a symbolem  $t_i^{path}$  cestovní dobu na cestě  $i$  (včetně dob čekání na výchozí zastávce a přestupních zastávkách). Počet cestujících z  $r$  do  $s$ , kteří použijí cestu  $k$ , je určený vztahem (6.20):

$$p_k^{rs} = \frac{\exp(\mu t_k^{path})}{\sum_{i \in K(r, s)} \exp(\mu t_i^{path})} p^{rs} \quad (6.20)$$

Koeficient  $\mu$  ve vztahu (6.20) je parametr klesající exponenciály, jehož hodnotu je v podmínkách konkrétního města třeba odhadnout. Hodnota parametru  $\mu$  může být různá nejenom pro řešená města, ale také pro různé skupiny cestujících.

Určitě platí, že  $\mu$  je záporné číslo, protože se vzrůstajícím časem přepravy klesá užitek plynoucí ze zvolené cesty. Graf na obr. č. 2 znázorňuje průběhy exponenciální funkce pro různé hodnoty parametru  $\mu$ .



Obrázek č. 2 Průběh exponenciální funkce pro různé parametry  $\mu$

Na základě vztahu (6.20) se identifikují toky cestujících na všech v úvahu přicházejících cestách pro všechny uspořádané dvojice  $(r, s)$ . Na základě identifikovaných toků a jejich velikostí lze na každém úseku  $a \in A$  vypočítat tok  $q_a$ . Tok  $q_a$  vznikne jako součet toků na všech cestách, které procházejí přes úsek  $a \in A$ .

Po skončení iteračního procesu můžeme vypočítat charakteristiky systému. Budou nás zajímat nejen hodnoty jednotlivých kritérií, ale také průměrný čas, který cestujících stráví ve vozidle, celková a průměrnou doba čekání na spoj, celkový a průměrný počet přestupů, minimální, maximální a průměrná délka linky vyjádřená počtem zastávek a v kilometrech, atp.

## 7. VÝPOČETNÍ EXPERIMENTY

Výpočetní experimenty se sestavenými modely byly prováděny v podmínkách městské hromadné dopravy v Žilině.

Město Žilina o rozloze 80,03 km<sup>2</sup> leží na severozápadním Slovensku v Žilinské kotlině. Je průmyslovým, správním, ekonomickým a kulturním centrem Žilinského samosprávného kraje, počtem obyvatel (85 299 ke dni 30. 6. 2009) je čtvrtým největším městem Slovenské republiky. Člení se na 20 městských částí: Bánová, Bôrik, Brodno, Budatín, Bytčica, Hájik, Hliny, Mojšova Lúčka, Považský Chlmec, Rosinky, Solinky, Staré mesto, Strážov, Trnové, Vlčince, Vranie, Zádubnie, Zástranie, Závodie, Žilinská Lehota [42]. Nejvýznamnějšími městskými částmi jsou Staré mesto, Vlčince a Solinky. Staré mesto je centrální částí Žiliny a Vlčince a Solinky jsou největšími sídlišti na území města.



*Obrázek č. 3 Letecký pohled na město Žilina [42]*

Z urbanistického hlediska jde o kombinaci radiálně okružního a satelitního města. Pro Žilinu je charakteristický výskyt centrální zóny, v okrajových částech se vyskytují jak velká sídliště, tak i nízkopodlažní obytná zástavba. Městské části Vlčince a Hájik je možno považovat za satelity města. Z hlediska dopravní obslužnosti obsluhují území města tři typy linek - radiální, diagonální a okružní.

Městská hromadná doprava hraje na území města Žiliny významnou roli, např. v roce 2008 byl podle [42] roční kilometrický výkon vozidel MHD 3,53 mil. km, přepraveno bylo 13,224 mil. cestujících. Informace vedoucí k sestavě matice přepravních vztahů byly čerpány z podkladů o cestujících přepravených v měsíci říjnu 2009.

## 7.1 Vstupní parametry pro výpočetní experimenty

Na základě modelů jsou pro realizaci výpočetních experimentů zapotřebí tři skupiny vstupních údajů:

- údaje o síti linek,
- údaje o přepravních požadavcích – vyjádřené OD maticí,
- údaje o vozidlovém parku.

### 7.1.1 Údaje o síti linek

Síť linek městské hromadné dopravy v Žilině, provozovaná společností Dopravný podnik města Žiliny, s.r.o. (dále jen „DPMŽ“), je v denní době tvořena osmi trolejbusovými linkami, označenými čísly 1, 3, 4, 5, 6, 7, 14 a 16 a deseti autobusovými linkami s číselným označením 20, 21, 22, 24, 26, 27, 29, 30, 31 a 99. V nočních hodinách obsluhuje území města jedna noční autobusová linka.

Trolejbusová doprava má páteřní charakter, obsluhuje většinu významných městských částí a odhaduje se, že přepraví přibližně 60% cestujících [43]. Autobusové linky mají spíše doplňkový charakter k linkám trolejbusovým, vyskytují se však linky zajíždějící i do centrálních částí města.

Konfigurace linkové sítě vztahmo k jednotlivým částem města je vyobrazena na obr. č. 4. Pro potřeby výpočetních experimentů bylo dále stanoveno:

- maximální přípustná frekvence  $f_l^{\max}$  byla nastavena stejně pro všechny linky, a to 8 spojů za hodinu,
- cestující smí přestupovat nejvýše jednou,
- tolerance frekvencí pro opakování výpočtu (obr. 1) byla nastavena na 10%.

Aktuální síť linek je vyobrazena na obr. č. 4.



Obrázek č. 4 Sít' linek MHD Žilina [43]

Do množiny přípustných linek byla kromě současných linek (s výjimkou existující linky č. 99) zahrnuta i nově navrhovaná trolejbusová linka (v tab. č. 1 je uvedena pod pořadovým číslem 18), spojující sídliště Vlčince a centrum města, jejíž trasa je následující: Fatranská – Matice slovenskej – Obchodná – Poštová – Vysokoškolská – Spanyolova, nemocnica – Štúrovo námestie – Polícia – Hurbanova – Železničná stanica – Štefánikovo námestie – Spanyolova, nemocnica – Vysokoškolská – Poštová – Obchodná – Fatranská. Navržená trasa totiž pokrývá nejkratší cesty pro 3 z 10 nejsilnějších proudů v ranní špičce (viz. dále kapitola 7.1.2).

Přestože síť linek MHD v Žilině není v porovnání s jinými krajskými městy například Ostrava, Košice apod., příliš rozsáhlá, je vhodné z hlediska snížení paměťové a časové náročnosti modelu provést určitou redukci. Redukce se týkala především zastávek, na kterých není možné přestupovat na jinou linku. Uvedené zastávky se nacházely zejména



v koncových úsecích linek v okrajových městských částech a neočekává se, že jejich zanedbání by ovlivnilo hodnoty dosažených výsledků.

Síť linek s redukováným počtem zastávek a nově navrženou trolejbusovou linkou obsahuje 79 zastávek a 190 úseků.

Pro potřeby v práci navrženého modelu je však vhodné upravit existující číslování linek. Je to především z důvodu, že některá čísla jsou v současném označování vynechána, což by mohlo zbytečně zkomplikovat zápis modelu do optimalizačního software. Obecný model lze pro potřeby výpočetních experimentů modifikovat v tom smyslu, že každé lince bude přidělen konkrétní druh dopravního prostředku, tzn. u v současnosti provozovaných linek nebude měněn druh dopravního prostředku, protože nároky, které vyplývají ze změny druhu dopravního prostředku, mohou mít za následek velké zásahy do rozsahu provozované infrastruktury (např. nutnost dobudování trakčního systému pro trolejbusovou dopravu do okolních obcí spadajících do katastrálního území města).

Způsob přečíslování linek je uveden v tabulce č. 1. První sloupec tabulky udává existující označení linek MHD Žilina, ve druhém sloupci je uvedeno identifikační označení linky použité v matematickém modelu a v posledních dvou sloupcích je uveden druh dopravního prostředku obsluhujícího danou linku (T – trolejbus, A – autobus) a doba oběhu uvedená v minutách.

*Tabulka č. 1 Přehled linek zařazených do širší množiny linek, způsob jejich přečíslování a základní informace pro potřeby matematického modelu*

Současné číslo linky	ID linky v rámci mat. modelu	Typ DP	Doba oběhu [min]
01	1	T	52
03	2	T	37
04	3	T	37
05	4	T	53
06	5	T	62
07	6	T	68
14	7	T	38
16	8	T	37
20	9	A	48
21	10	A	47
22	11	A	55
24	12	A	60
26	13	A	58
27	14	A	60
29	15	A	57
30	16	A	22
31	17	A	58

### 7.1.2 Údaje o přepravních požadavcích

Zájem cestujících o MHD byl odvozen ze statistických údajů, které byly pro potřeby práce poskytnuty DPMŽ. Statistické údaje obsahovaly informace o počtu cestujících nastupujících na každé zastávce jednotlivých linek v průběhu týdne od 12. do 18. 10. 2009. Údaje se archivují v elektronických zařízeních umístěných ve vozidle, které slouží pro označení čipových karet a papírových cestovních lístků. Počet čipových karet a cestovních lístků označených na jednotlivých zastávkách tak reprezentuje tok cestujících, kteří na dané zastávce vstoupili do systému MHD.

OD matice byla sestavena na základě údajů o cestujících hradících přepravné prostřednictvím čipových karet. Cestující využívající čipových karet jsou podle platného přepravního řádu povinni provést přihlášení (přiloží svou čipovou kartu k odbavovacímu zařízení, které zaznamená jejich nástup do vozidla) bezprostředně po nástupu do dopravního prostředku. Pro potřeby naplnění matice přepravních vztahů je zapotřebí mít dále informaci udávající, na které zastávce cestující systém MHD opustil. Protože však v podmínkách MHD Žilina platí, že cestující při výstupu z vozidla již čipovou kartu

k odbavovacímu zařízení nepřikládá, není možné uvedeným způsobem místo výstupu cestujícího z vozidla přesně lokalizovat. Proto bylo při lokalizaci místa výstupu použito následujícího předpokladu. Cestující, který použije dopravní prostředek pro dopravu do zaměstnání, školy (což je možno považovat za většinu uskutečňovaných cest), zpravidla vstupuje do systému MHD v místě, ve kterém ze systému vystoupil při předchozí jízdě, což lze zjistit z identifikačních údajů o čipových kartách.

Na základě uvedených předpokladů bylo tedy odhadnuto směřování proudů cestujících a jejich velikost, což bylo následně použito pro potřeby výpočetních experimentů. Parametr  $\mu$  byl při modelování chování cestujících nastaven na hodnotu  $\mu = -0,1$ . Model chování cestujících se ovšem nepodařilo verifikovat, tzn. že jeho výsledky nebyly porovnány se skutečným chováním cestujících. To by bylo možné pouze na základě relevantních údajů z rozsáhlých socioekonomických průzkumů.

### 7.1.3 Údaje o vozidlovém parku

Celkový počet vozidel evidovaných k 1. 1. 2010 v DPMŽ je 89, z čehož je 44 trolejbusů značky Škoda vyrobených v rozmezí let 1991 – 2001 a 45 autobusů převážně značek Karosa a Irisbus, které byly vyrobeny v rozmezí let 1990 – 2007. Základní přehled o vozidlovém parku DPMŽ s údaji potřebnými pro realizaci výpočetních experimentů je uveden v tabulkách č. 2 a č. 3.

*Tabulka č. 2 Typy autobusů, jejich kapacita a emisní úroveň*

p. č.	typ vozidla	kapacita vozidla [míst]	emisní úroveň	počet vozidel typu
1	Karosa B 732	94	EURO 1	9
2	Karosa B 741	150	EURO 2	1
3	Karosa B 932	95	EURO 2	6
4	Karosa B 952	100	EURO 4	17
5	Karosa B 961	168	EURO 4	3
6	Renault city bus PS09D1	100	EURO 4	3
7	Irisbus Citelis PS09D1	100	EURO 4	3
8	Irisbus Citelis PS09D2	96	EURO 4	1
9	Irisbus Citelis PS09D1	157	EURO 4	2

*Tabulka č. 3 Typy trolejbusů a jejich kapacita*

p.č.	typ vozidla	kapacita vozidla [míst]	počet vozidel typu
1	Škoda 14 Tr	83	13
2	Škoda 15 Tr	150	17
3	Škoda 15 TrM	150	14

## 7.2 Příprava vstupních dat pro výpočetní experimenty

Skupinu údajů potřebných pro realizaci výpočtu je možno rozdělit do dvou podskupin. První podskupinu tvoří údaje, které mohou být přímo dosazeny do matematického modelu (6.3) – (6.16), druhou podskupinu údajů budou tvořit údaje, které je nutné z disponibilních údajů dodatečně připravit.

Do první podskupiny budou patřit údaje:

- velikost přepravních toků mezi zastávkami,
- počet úseků dopravní sítě,
- oběžné doby linek,
- délky tras jednotlivých linek,
- počty vozidel,
- kapacita vozidel,
- kapacita vozidlového parku,
- množina druhů dopravních prostředků,
- množina typů vozidel v rámci jednotlivých druhů.

Do druhé podskupiny budou patřit údaje:

- objem emisí vyprodukovaných vozidly na jednotlivých linkách.

Další text bude věnován postupu přípravy vstupních údajů zařazených do druhé podskupiny, tj. výpočtu objemů emisí vyprodukovaných vozidly na jednotlivých linkách.

Základním předpokladem pro výpočet objemu emisí produkovaných jedoucimi dopravními prostředky je znalost rozhodujících emisních faktorů, které je možno obecně rozdělit do dvou základních skupin:

- emisní parametry vozidel (parametry vyplývající z technických charakteristik vozidel),
- traťové emisní parametry (parametry vyplývající z nasazování vozidel jednotlivých druhů a typů na trasy linek).

Do skupiny vozidlových a emisních parametrů lze zařadit kategorii vozidla, emisní úroveň EURO, palivo používané pro dané vozidlo a stáří a míru opotřebení vozidla. Do druhé skupiny se řadí sklonové poměry na ujeté trase, rychlost jízdy vozidla a plynulost provozu, jímž je jízda vozidla ovlivňována.

Existuje několik způsobů výpočtů objemu emisí produkovaných dopravními prostředky. Za obecně uznávaný způsob výpočtu se považuje postup, kdy jsou emise počítány z objemu spotřebovaného paliva. Z pohledu řešené práce by to však znamenalo mít k dispozici informace o spotřebě paliva na jednotlivých linkách pro jednotlivé skupiny vozidel, což je informace nedostupná a neoprávnitelná. Každé vozidlo by muselo absolvovat průjezd všemi linkami zařazenými v širší množině linek, nehledě k tomu, že objemy spotřebovaného paliva se mohou lišit nejen v závislosti na stáří vozidla, ale také i na technice jízdy konkrétního řidiče, atp.

K výpočtu objemu emisí produkovaných jednotlivými skupinami vozidel tak bude použit zjednodušený postup založený na využití jednoduchého volně dostupného software MEFA 06 (dále jen MEFA), který umožňuje výpočet objemu emisí produkovaných vozidly pro široké spektrum znečišťujících látek s důrazem na hlavní složky výfukových plynů. Z tohoto spektra byla pro potřeby optimalizačního výpočtu jako reprezentativní vybrána položka emise CO.

Výstupy z výpočtů prováděných v programu MEFA jsou uváděny v  $\text{g.km}^{-1}$  vždy pro příslušnou znečišťující látku. Objemy produkovaných emisí jsou v programu MEFA počítány pro ustálený režim jízdy, tj. bez zohlednění zvýšených emisí produkovaných vozidly například při „studených startech“ nebo jiných provozních mimořádnostech. Rovněž nejsou při výpočtu objemů emisí zohledněny odpary uhlovodíků vznikající v průběhu odstavení vozidel.

Z výše uvedených faktorů ovlivňujících objem produkovaných znečišťujících látek se do programu MEFA zadávají následující informace:

- **Výpočtový rok** – odpovídá aktuálnímu roku, ve kterém se provádí výpočet. Prostřednictvím daného vstupního pole se do programu MEFA zadává informace o platnosti emisních předpisů a o kvalitě distribuovaného paliva ve výpočetním roce. V oblasti výpočtového roku umožňuje program zadávat časové rozmezí let 1995 – 2020.
- **Kategorie vozidla** – prostřednictvím tohoto údaje se do programu při výpočtu emisí zadává informace, zda se emise počítají pro osobní automobily, autobusy, lehké a těžké nákladní automobily.
- **Palivo** – prostřednictvím této informace se v programu MEFA zohledňuje použitý typ paliva. MEFA umožňuje výběr ze čtyř typů paliva - benzín, diesel, CNG, LPG.
- **Emisní úroveň** – udává informace o platných emisních předpisech v roce výroby vozidla. MEFA nabízí pět emisních úrovní a to: konvenční (bez katalyzátoru), EURO 1, EURO 2, EURO 3, EURO 4. Norma EURO se stanovuje podle roku výroby vozidla. Dá se předpokládat, že tento typ údaje společně s výpočtovým rokem zohledňuje v programu MEFA stáří a míru opotřebení vozidel.
- **Plynulost provozu** – informace o plynulosti provozu je udávána prostřednictvím škály obsahující celočíselné hodnoty z intervalu 1 – 10 včetně. Plynulost provozu ohodnocená stupněm 1 reprezentuje plynulou jízdu a plynulost provozu ohodnocena stupněm 10 charakterizuje stojící a popojíždějící kolony.
- **Podélný sklon vozovky** – prostřednictvím této informace se ve výpočtu zohledňují sklonové poměry na trase vozidla. Kladné hodnoty vyjadřují stoupání a záporné hodnoty klesání pozemní komunikace.
- **Rychlost jízdy** – prostřednictvím tohoto vstupního pole volíme průměrnou rychlost dopravního proudu, což souvisí s plynulostí provozu a je udávána v  $\text{km.h}^{-1}$ . V programu MEFA je možno volit maximální rychlost vozidla  $100 \text{ km.h}^{-1}$ .

Ukázka pracovního prostředí v programu MEFA je uvedena na obr. č. 5.

The screenshot shows the MEFA software interface with the following components:

- Program Menu:** Program, Editovat, Nápověda
- Input Parameters:**
  - Výpočtový rok: 2010
  - Kategorie vozidla: BUS
  - Charakteristika vozidla:
    - Palivo: Diesel
    - Emisní úroveň: Euro 3
  - Charakteristika podmínek provozu:
    - Plynulost provozu: 4
    - Podélný sklon vozovky (%): 0
    - Rychlost jízdy (km/h): 27
- Output Table:**

Emitovaná škodlivina	Emisní faktor
NO <sub>x</sub> (g/km)	7.1881
CO (g/km)	5.3024
SO <sub>2</sub> (g/km)	0.0281
PM (g/km)	0.4065
PM <sub>10</sub> (g/km)	0.3821
NO <sub>2</sub> (g/km)	0.9717
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> (g/km)	1.5695
methan (g/km)	0.0618
propan (g/km)	0.0016
1,3-butadien (g/km)	0.0009
benzen (g/km)	0.0214
toluen (g/km)	0.0068
styren (g/km)	0.0068
formaldehyd (g/km)	0.1985
acetaldehyd (g/km)	0.0972
- Buttons:** << Zpět, Výpočet faktoru
- Text:** Max. rychlost vozidla je 100 km/h.

Obrázek č. 5 Pracovní prostředí software MEFA. 06

Z pohledu potřeb programu MEFA by bylo zapotřebí, aby každá z linek byla dekomponována na dílčí úseky charakteristické např. přibližně stejnými sklonovými poměry, přibližně stejnou plynulostí provozu a pro dané úseky by se vypočítaly hodnoty objemů produkovaných emisí odděleně.

Protože linky městské hromadné dopravy v Žilině je možno považovat za kyvadlové, dá se do jisté míry uvažovat s určitým vykompenzováním sklonových poměrů na trasách linek (v jednom směru stoupání, ve druhém směru klesání). Dalo by se tedy uvažovat s tím, že například stoupání v jednom směru a klesání v druhém je možno nahradit jízdou po rovině. Za tím účelem byly v programu MEFA provedeny experimenty, které měly ukázat rozdílnost průměrů objemů emisí vypočítaných pro jízdu typu stoupání a klesání 2% a objemu emisí vypočítaných pro jízdu po rovině při různých rychlostech autobusu. Průměrná hodnota je zde počítána pouze pro stoupání a klesání. Uvedené odchylky v  $\text{g.km}^{-1}$  se pohybovaly v intervalu  $\langle 0,12; 0,17 \rangle$ , jak je patrné z tabulky č. 4.

Tabulka č. 4 Vypočtené emise autobusů pro jednotlivé podélné sklony

rychlost [km.h <sup>-1</sup> ]	vypočtené emise pro podélný sklon v [g.km <sup>-1</sup> ]			průměrná hodnota emisí [g.km <sup>-1</sup> ]	odchylka [g.km <sup>-1</sup> ]	odchylka [%]
	sklon -2%	sklon 0%	sklon 2%			
20	5,0302	7,2113	9,0529	7,04155	0,16975	2,3539
25	4,4235	6,3416	7,961	6,19255	0,14905	2,3504
30	3,9564	5,672	7,1204	5,5384	0,1336	2,3554
35	3,5827	5,1361	6,4478	5,01525	0,12085	2,3530

### Aplikace obecného postupu

Výpočet emisí v MHD v Žilině bude proveden v podmínkách autobusové dopravy. Emise produkované trolejbusy při jízdě městem jsou v porovnání s emisemi produkovanými autobusy zanedbatelné. To ovšem neznamená, že by důsledkem provozování trolejbusové dopravy nevznikaly emise. V konečném důsledku vznikají, emise z trolejbusové dopravy však zpravidla nezatěžují tolik životní prostředí obyvatelstva měst. Navíc výpočet objemu emisí vyprodukovaného elektrárnami pro potřeby trolejbusové dopravy v městě Žilina by byl značně komplikovaný.

**Zásady pro výpočet objemů emisí produkovaných autobusy v programu MEFA v podmínkách DPMŽ:**

- **výpočtový rok** – 2010,
- **palivo** - nafta (diesel),
- **rychlost jízdy** – viz tabulka č. 5,
- **plynulost provozu** - 4 (mírně zvýšený provoz na komunikacích, kterými trasa linky vede),
- **stanovení emisní úrovně** – vyplývá z roku výroby autobusu, viz tabulka č. 2,
- **sklonové poměry na trati** – 0, viz zdůvodnění výše.



Tabulka č. 5 Průměrná rychlost na lince

popis linky	průměrná rychlost [km.h <sup>-1</sup> ]
Linka č. 20 směr Rosinská, VÚVT	23,75
Linka č. 20 směr Bytčice	23,50
Linka č. 21 směr Bánová	21,75
Linka č. 21 směr Považský Chlmec	22,96
Linka č. 22 směr Bytčice	24,21
Linka č. 22 směr Brodno	24,22
Linka č. 24 směr Strážov	21,80
Linka č. 24 směr Trnové	21,40
Linka č. 26 směr Rosinky	20,40
Linka č. 26 směr LP	21,64
Linka č. 27 směr Hájik	24,60
Linka č. 27 směr Zástranie	26,80
Linka č. 29 směr Žilinská Lehota	26,25
Linka č. 29 směr Budatín	24,19
Linka č. 30 směr Vranie	27,82
Linka č. 30 směr Železničná stanica	27,82
Linka č. 31 směr Mojšova Lúčka	26,60
Linka č. 31 směr Závodie	25,29

### 7.3 Experimenty

V rámci experimentální části práce byla navržena soustava linek pro čtyři různá časová období:

- pro ranní přepravní špičku pracovního dne (od 6:00 do 8:00 hodin),
- pro ranní přepravní sedlo pracovního dne (od 8:00 do 14:00 hodin),
- pro odpolední přepravní špičku pracovního dne (od 14:00 do 17:00 hodin),
- pro víkendový den (od 4:00 do 23:00 hodin).

Princip práce programů, se kterými pracuje optimalizační software, je následující:

Na začátku řešení modelu (6.3) – (6.16) jsou načítány vstupní údaje (topologické údaje o posuzované síti linek, širší množina linek, doby oběhů v minutách pro jednotlivé linky, kapacity vozidel podle jednotlivých typů v rámci druhů dopravních prostředků a jejich počty, prvky OD matice a objemy emisí vyprodukovaných při nasazení vozidel na jednotlivé linky. Následuje výpočtová fáze, kdy se postupně počítají jednokriteriální

modely (minimalizující celkovou dobu všech cestujících při přepravě, dopravní výkon a objem vyprodukovaných emisí) a následně je celý výpočet opakován pro kombinaci všech kritérií. Na závěr výpočtu jsou výsledky (přidělené počty vozidel na jednotlivé linky a frekvence linií) zapsány do textového souboru.

Na řešení modelu navazuje (6.3) - (6.16) navazuje iterační proces znázorněný cyklem, který je zobrazen na obrázku č. 1. Pomocí modelu diskrétního výběru se modeluje chování cestujících na navržené síti linek. Výsledkem diskrétního výběru jsou úsekové intenzity cestujících, které vstupují do zjednodušeného modelu (6.4), (6.5), (6.19) za podmínek (6.11) – (6.13), (6.15) – (6.18).

U zjednodušeného modelu jsou na začátku obdobně jako u předchozího modelu načítány vstupní údaje (topologické údaje o posuzované síti linek, širší množina linek, doby oběhů v minutách pro jednotlivé linky, kapacity vozidel podle jednotlivých typů v rámci druhů dopravních prostředků a jejich počty, objemy emisí vyprodukovaných při nasazení vozidel na jednotlivé linky, toky cestujících na jednotlivých hranách). Následuje výpočtová fáze, kdy se postupně počítají jednokriteriální modely (minimalizující dopravní výkon a objem vyprodukovaných emisí a maximalizující komfort) a následně je celý výpočet opakován pro kombinaci všech kritérií. Výsledky jsou zapsány do textového souboru. Nové frekvence se porovnají s předcházejícími, a pokud se liší o méně, než udává zvolená tolerance, výpočet končí, v opačném případě se přepočítají úsekové intenzity cestujících na nové síti modelem diskrétního výběru a opět se řeší zjednodušený model.

Pro současnou síť linek a návrhy, které jsou výsledkem řešení matematických modelů, bylo při každém experimentu vypočítáno 8 charakteristik, kterými jsou:

- počet linek,
- použitý počet vozidel,
- dopravní výkon vyjádřený ve vozokilometrech za řešené období,
- doba jízdy ve vozidle,
- doba čekání na výchozí a přestupní zastávce,
- počet přestupů,
- minimální poměrná rezerva mezi nabízeným počtem míst a průměrným požadavkem cestujících na daném úseku (nejhorší komfort),

- celkový objem emisí produkovaný všemi nasazenými vozidly.

V níže uvedených tabulkách č. 6 – 9 jsou prezentovány výsledky těchto řešení:

- řešení (1. fáze) je kompromisním řešením modelu (6.3) – (6.16) - výstupem je nastavení počáteční frekvence linek ( $f_0$ ),
- optimální řešení (1. fáze minimalizace času) je optimálním řešením modelu (6.3), (6.6) – (6.16) – výstupem je optimální řešení z hlediska doby jízdy ve vozidle,
- optimální řešení (1. fáze minimalizace výkonu) je optimálním řešením modelu (6.4), (6.6) – (6.16) – výstupem je optimální řešení z hlediska dopravního výkonu,
- optimální řešení (1. fáze minimalizace emisí) je optimálním řešením modelu (6.5), (6.6) – (6.16) – výstupem je optimální řešení z hlediska celkového objemu emisí vyprodukovaných všemi vozidly,
- řešení (2. fáze) je řešením celého postupu v práci navrženého algoritmu,
- řešení (2. fáze, kdy se maximalizuje pohodlí) představuje hodnotu účelové funkce (6.19) za podmínek (6.11) – (6.13), (6.15) – (6.18), po provedení poslední iterace navrženého algoritmu,
- řešení (2. fáze, kdy se minimalizuje výkon) představuje hodnotu účelové funkce (6.4) za podmínek (6.11) – (6.13), (6.15) – (6.18), po provedení poslední iterace navrženého algoritmu,
- řešení (2. fáze, kdy se minimalizují emise) představuje hodnotu účelové funkce (6.5) za podmínek (6.11) – (6.13), (6.15) – (6.18), po provedení poslední iterace navrženého algoritmu.

Vlastní výpočty byly prováděny na osobním počítači s parametry Intel Core 2 67000 (2,66GHz) a s 3 GB RAM.

### 7.3.1 Dosažené výsledky pro ranní špičku od 6:00 do 8:00

Výsledky řešení jsou uvedeny v tabulce č. 6.

Tabulka č. 6 Výsledky pro ranní přepravní špičku

Ranní špička 6:00 - 8:00								
	Počet linek	Počet vozidel	Výkon [voz.km]	Doba jízdy [h]	Doba čekání [h]	Počet přestupů	Pohodlí	Emise
<b>Březen 2010</b>	17	37	648,94	1454	866	2457	*	**
<b>Řešení (1. fáze)</b>	12	12	232,80	1494	2238	2817	*	872,67
<b>Opt. řešení (1. fáze minimalizace času)</b>	15	58	1049,00	1388	753	2944	*	2626,54
<b>Opt. řešení (1. fáze minimalizace výkonu)</b>	11	11	223,50	1492	2239	2813	*	1381,63
<b>Opt. řešení (1. fáze minimalizace emisí)</b>	17	44	661,80	1388	1060	2685	*	807,31
<b>Řešení (2. fáze)</b>	15	23	361,90	1470	1225	2241	1,60	954,04
<b>Řešení (2. fáze maximalizace pohodlí)</b>	17	62	1103,10	1419	679	2537	2,83	5162,97
<b>Řešení (2. fáze minimalizace výkonu)</b>	14	19	301,10	1459	1305	2238	1,00	348,31
<b>Řešení (2. fáze minimalizace emisí)</b>	14	30	425,10	1393	1050	2457	1,00	472,65

Pozn.: Chybějící hodnoty u \*pohodlí a \*\*emisí nejsou pro současný stav vypočítány, protože v současném stavu vozidla obsluhují více linek. S kritériem pohodlí není v 1. fázi uvažováno.

Výpočet pro období ranní špičky obsahoval pět iterací. Ve výsledném řešení (šestý řádek tabulky) nebyla přidělena žádná vozidla na trolejbusové linky č. 1, 5 a 6, což znamená, že tyto linky by v uvedeném období nebyly provozovány. Linka č. 5 spojuje sídliště Solinky a Vlčince a částečně vede středem města. V ranní špičce není takový zájem o dopravu mezi sídlišti a spojení sídlišť s centrem města v navrženém řešení zabezpečují jiné linky. Podobná situace je s linkou č. 6 spojující sídliště Hájik a Vlčince. Intenzivně je provozována nově navržená linka, které byla přidělena tři vozidla, což při její oběžné době 31 minut představuje nabídku téměř šest spojů za hodinu v každém směru.

Porovnání současné a navržené sítě linek ukazuje, že se na základě sestaveného a vyřešeného modelu velká váha klade na hledisko dopravce. Jak je uvedeno výše, náklady dopravce přímo souvisí s přepravním výkonem a ten zase závisí na počtu použitých vozidel. Počet vozidel klesl v řešení na 2/3 současného stavu a výkon téměř o polovinu. Menší počet obsluhovaných linek a použitých vozidel se neprojevil na době, kterou stráví všichni cestující jízdou ve vozidle. Menší počet přidělených vozidel však znamená menší frekvenci linek, a tedy delší dobu čekání, která je o polovinu vyšší než v současnosti, a to i díky skutečnosti, že klesl počet přestupů (o necelých 9%).

Pro stanovení skutečné důležitosti jednotlivých kritérií by byla potřebná spolupráce experta na dopravní plánování.

Porovnáním výsledného řešení (6. řádek) a řešení 1. fáze (2. řádek) potvrzujeme nedostatek modelu (6.3) – (6.16), který, jak je zdůrazněno, vypočítá systémové optimum. V tomto řešení ještě více vystupuje do popředí výkon na úkor kvality z hlediska cestujících. Aby bylo možné dostat plán linek, který se nejvíce přibližuje potřebám cestujících, je třeba provést druhou fázi řešení, ve které se frekvence linek přizpůsobí chování cestujících.

Ostatní výsledky jsou jen informativní a ukazují, jak se na řešení projeví preferování pohledu cestujících.

Výpočet výše uvedeného modelu pomocí optimalizačního software *Xpress-MP* trval na počítači s výše uvedenými parametry přibližně 25 minut.

### 7.3.2 Dosažené výsledky pro ranní přepravní sedlo od 8:00 do 14:00

Výsledky řešení jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka č. 7 Výsledky pro ranní přepravní sedlo

Ranní sedlo 8:00 - 14:00								
	Počet linek	Počet vozidel	Výkon [voz.km]	Doba jízdy [h]	Doba čekání [h]	Počet přestupů	Pohodlí	Emise
<b>Březen 2010</b>	17	20	344,70	2287	2183	3327	*	**
<b>Řešení (1. fáze)</b>	14	14	244,90	2121	899	5109	*	807,31
<b>Opt. řešení (1. fáze minimalizace času)</b>	15	58	1091,80	2269	1174	4898	*	2531,66
<b>Opt. řešení (1. fáze minimalizace výkonu)</b>	14	14	244,90	2356	2666	3454	*	877,43
<b>Opt. řešení (1. fáze minimalizace emisí)</b>	15	40	715,90	2245	1437	4679	*	807,31
<b>Řešení (2. fáze)</b>	16	22	349,50	2121	899	5109	1,24	903,20
<b>Řešení (2. fáze maximalizace pohodlí)</b>	17	53	956,50	2312	1222	4621	1,85	2204,85
<b>Řešení (2. fáze minimalizace výkonu)</b>	16	20	326,50	2346	2222	3425	1,00	895,83
<b>Řešení (2. fáze minimalizace emisí)</b>	16	40	651,60	2269	1448	4481	1,00	807,31

Pozn.: Chybějící hodnoty u \*pohodlí a \*\*emisí nejsou pro současný stav vypočítány, protože v současném stavu vozidla v rámci svých oběhů obsluhují více linek. S kritériem pohodlí není v 1. fázi uvažováno.

Výpočet pro období ranního přepravního sedla obsahoval pět iterací. Na linky 1 a 6 by podle získaných výsledků nebyla přidělena žádná vozidla, což znamená, že tyto linky v období ranního přepravního sedla nebudou podle navrženého řešení v provozu. Linka č. 6 může být analogicky jako v období ranní špičky, zastoupena spoji jiných linek vedoucích ze sídliště Hájk do centra města.

Porovnání současné a navržené sítě linek ukazuje, že v navrženém řešení vzrostl ve srovnání se současným stavem počet vozidel o 2 při zachování dopravního výkonu v téměř nezměněné výši. Ačkoli je provozováno méně linek, doba jízdy, kterou stráví cestující ve vozidle, se sníží jen nepatrně (o 7,25 %). Vyšší počet přidělených vozidel na linky znamená, že se zvýšila frekvence některých linek, což má za následek kratší dobu čekání cestujících, která se snížila o 58,2 %, ale dramaticky se zvýšil počet přestupů (o 53,6 %), což je patrné z výše uvedené tabulky č. 7.

### 7.3.3 Dosažené výsledky pro odpolední špičku od 14:00 do 17:00

Výsledky řešení jsou uvedeny v tabulce č. 8.

Tabulka č. 8 Výsledky pro odpolední přepravní špičku

Odpolední špička 14:00 - 17:00								
	Počet linek	Počet vozidel	Výkon [voz.km]	Doba jízdy [h]	Doba čekání [h]	Počet přestupů	Pohodlí	Emise
Březen 2010	17	35	599,42	1819	1200	2618	*	**
Řešení (1. fáze)	14	14	244,90	1896	2228	2560	*	807,31
Opt. řešení (1. fáze minimalizace času)	17	56	1047,60	1767	846	3567	*	2691,41
Opt. řešení (1. fáze minimalizace výkonu)	13	13	244,20	1887	2411	2099	*	1965,56
Opt. řešení (1. fáze minimalizace emisí)	14	36	632,50	1804	1268	3560	*	807,31
Řešení (2. fáze)	15	22	345,60	1831	1567	2724	1,453	858,93
Řešení (2. fáze maximalizace pohodlí)	15	59	1058,20	1692	831	3457	2,298	4586,58
Řešení (2. fáze minimalizace výkonu)	14	20	312,90	1833	1546	2812	1,00	1085,70
Řešení (2. fáze minimalizace emisí)	15	38	626,40	1794	1268	3370	1,00	807,31

Pozn.: Chybějící hodnoty u \*pohodlí a \*\*emisí nejsou pro současný stav vypočítány, protože v současném stavu vozidla v rámci svých oběhů obsluhují více linek. S kritériem pohodlí není v 1. fázi uvažováno.

Výpočet pro období odpolední špičky obsahoval dvě iterace. Na linky 1, 5 a 6 by podle získaných výsledků nebyla přidělena žádná vozidla, což znamená, že tyto linky v období odpolední špičky nebudou podle navrženého řešení v provozu. Co se týče linek číslo 1 a 6, ty mohou být zastoupeny spoji jiných linek. Linka č. 5 může být, analogicky jako v období ranní špičky, taktéž zastoupena spoji jiných linek vedoucích ze sídliště Solinky do centra města.

Porovnání současného stavu sítě linek s řešením prezentovaným v 6. řádku tabulky ukazuje, že v řešení klesl počet vozidel o 13 ve srovnání se současným stavem a dopravní výkon téměř o polovinu. Ačkoli je provozováno méně linek, doba jízdy, kterou stráví cestující ve vozidle, se zvýší jen nepatrně. Menší počet přidělených vozidel na linky znamená, že se snížila frekvence linek, což má za následek delší dobu čekání, která se zvýšila o 30,5 % a taktéž se zvýšil počet přestupů (o 4 %), což je patrné z výše uvedené tabulky č. 8.

### 7.3.4 Dosažené výsledky pro víkendový den od 4:00 do 23:00

Výsledky řešení jsou uvedeny v tabulce č. 9.

*Tabulka č. 9 Výsledky pro víkendový den*

Víkendový den 4:00 - 23:00								
	Počet linek	Počet vozidel	Výkon [voz.km]	Doba jízdy [h]	Doba čekání [h]	Počet přestupů	Pohodlí	Emise
<b>Březen 2010</b>	15	12	203,97	1920	2649	2532	*	**
<b>Řešení (1. fáze)</b>	12	12	205,70	1916	2127	2390	*	629,77
<b>Opt. řešení (1. fáze minimalizace času)</b>	15	53	954,50	1856	1018	3678	*	2193,56
<b>Opt. řešení (1. fáze minimalizace výkonu)</b>	11	11	200,20	1982	2261	3307	*	681,39
<b>Opt. řešení (1. fáze minimalizace emisí)</b>	15	42	954,50	1816	1105	3209	*	629,77
<b>Řešení (2. fáze)</b>	12	23	330,60	1891	1214	3066	1,55	839,22
<b>Řešení (2. fáze maximalizace pohodlí)</b>	15	49	829,90	1811	869	3206	2,74	2312,47
<b>Řešení (2. fáze minimalizace výkonu)</b>	13	17	268,00	1976	1586	2792	1,00	699,89
<b>Řešení (2. fáze minimalizace emisí)</b>	13	37	596,50	1842	1084	3458	1,00	629,77

Pozn.: Chybějící hodnoty u \*pohodlí a \*\*emisí nejsou pro současný stav vypočítány, protože v současném stavu vozidla v rámci svých oběhů obsluhují více linek. S kritériem pohodlí není v 1. fázi uvažováno.

Výpočet pro období víkendového dne obsahoval pět iteračních kroků. Podle řešení druhé fáze nebyla přidělena vozidla linkám 1, 5, 6, 7, 20 a 26, což znamená, že tyto linky v období víkendových dnů nebudou podle navrženého řešení v provozu. Tato skutečnost je dána především tím, že se snížila poptávka po přepravě během dnů pracovního klidu.

Porovnání současného stavu sítě linek s řešením ukazuje, že v organizaci dopravy se v současnosti během víkendu zohledňuje více nákladové kritérium dopravce než čas cestujících. Ačkoliv se snížil počet provozovaných linek z 15 na 10 je nutno použít více vozidel pro jejich obsluhu. Zvýšení počtu vozidel, které obsluhují jednotlivé linky, má za následek zvýšení dopravního výkonu téměř o 62%.

V komentáři k tabulkám č. 6 – 9 bylo uvedeno, že pro současný stav a 2. fázi řešení by bylo velmi obtížné vypočítat hodnotu minimální poměrné rezervy. Tento fakt vyplývá ze skutečnosti, že v současné době nejsou v podmínkách DPMŽ vozidla pevně přidělována jednotlivým linkám, ale obsluhují spoje různých linek. Kdybychom chtěli vypočítat hodnotu minimální poměrné rezervy, museli bychom na každém úseku znát skutečnou



(nikoliv modelem stanovenou bez ověření, pouze na základě výsledků diskrétního výběru) poptávku po přepravě a pro každý spoj na lince bychom museli znát typ vozidla, který jej obsluhuje. Na základě těchto parametrů by se pro každý úsek následně vypočítala hodnota poměrné rezervy, a to jako podíl počtu nabízených míst a počtu průměrně požadovaných míst cestujícími na tomto úseku. Z vypočtených hodnot na jednotlivých úsecích se vybere minimální z nich.

#### *Závěrečné zhodnocení*

V období ranní špičky bylo v rámci řešení provozováno méně linek, než tomu je v současném stavu. Na linky bylo přiděleno o 1/3 méně vozidel a dopravní výkon se snížil téměř o jednu polovinu. Menší počet vozidel se neprojevil na době přepravy, ale na snížení frekvence linek, což způsobilo delší dobu čekání na spoj.

Porovnáním současného stavu s řešením v období ranního přepravního sedla můžeme sledovat, že došlo ke snížení počtu provozovaných linek v dopravní síti. V této souvislosti se zvýšil počet obsluhujících vozidel na jednotlivých linkách, což mělo za následek nepatrné zvýšení celkového dopravního výkonu, ale naopak snížení doby čekání a doby přepravy.

Z porovnání současného stavu sítě linek s řešením v období odpolední špičky je patrné, že v řešení bude provozováno méně linek a linkám bude přidělen menší počet obsluhujících vozidel, čímž dojde k snížení dopravního výkonu (téměř o polovinu). Menší počet obsluhovaných linek a použitých vozidel se neprojevil na době přepravy, kterou všichni cestující stráví jízdou ve vozidle, ale menší počet přidělených vozidel znamená sníženou frekvenci linek, což způsobí nárůst doby čekání o 30,5 %.

V období víkendového dne bylo prokázáno, že v modelu je kladen velký důraz na požadavky cestujících. Z pohledu cestujícího došlo k razantnímu snížení doby čekání na spoj, a to i přesto, že se snížil počet provozovaných linek o 5. Na linky je nasazován vyšší počet vozidel, což vedlo k zvýšení dopravního výkonu, počtu přestupů a snížení doby přepravy.

#### **7.4 Kritická analýza dosažených výsledků**

Ačkoliv základní rozbor dosažených výsledků již byl proveden v předchozí podkapitole, je důležité zabývat se dopady navržených opatření podrobněji – je nutno provést důkladnější kritickou analýzu dosažených výsledků.

Kritické analýze budou podrobeny výsledky dosažené pro všechna výše uvedená časová období. Se současným stavem budou srovnávány výsledky dosažené po provedení druhé fáze výpočtu, ve kterém se provádí řešení modelu zohledňujícího již neměnné toky cestujících na jednotlivých hranách sítě linek.

Výchozím podkladem pro kritickou analýzu pro každé období bude tabulka hodnot, která obsahuje současné označení linky, současnou frekvenci spojů a frekvenci navrženou na základě optimalizačního výpočtu.

V rámci kritické analýzy bude pozornost zaměřena zejména na linky, které vykazují v navrženém řešení nižší frekvenci spojů nebo linky, které podle navrženého řešení nebudou provozovány vůbec. U linek, které podle navrhovaného řešení nebudou v provozu, budou při kritické analýze sledovány významné toky a bude hodnoceno, do jaké míry je cestování v těchto tocích ovlivněno navrženými změnami sítě linek. Co se týče identifikace proudů, které budou předmětem kritické analýzy, je možno zvolit dva přístupy. Při prvním přístupu se zvolí určitý počet nejsilnějších proudů v OD matici (např. 10) a zjišťuje se vliv navrženého vedení linek na jejich obsluhu. Při způsobu druhém nebude rozhodující počet proudů, ale zadána hraniční intenzita např. 70 za hodinu. Pro potřeby kritické analýzy v předložené práci bude zvolen druhý z uvedených přístupů, při kterém bude hodnota hraniční intenzity činit 30 za hodinu (včetně). V odůvodněných případech bude hodnota mezní intenzity i snížena.

Výchozím podkladem pro uvažovanou kritickou analýzu bude OD matice. Struktura OD matice totiž nejen umožňuje identifikovat přepravní proudy (kromě získání informací o intenzitě přepravního proudu) mezi dvěma zastávkami, ale také rozlišit intenzity mezi těmito zastávkami podle jednotlivých směrů. Budou-li intenzity pro oba směry různé, bude pro potřeby kritické analýzy volen vždy směr s vyšší intenzitou.

V rámci kritické analýzy bude tedy posuzováno, do jaké míry se zhorší kvalita cestování pro výše vybrané významné toky cestujících, zejména z hlediska nařízené přestupovosti. To přichází v úvahu v případech, kdy v navrženém řešení dojde ke zrušení přímé linky, u které se předpokládá, že ji cestující ve významném přepravním proudu využívali.

V dalším postupu se zjišťuje, zda došlo k navýšení frekvence spojů na linkách, u nichž se uvažuje o tom, že nahradí linky zrušené. Obdobného efektu, při zachování počtu spojů by bylo dosaženo nasazením vozidel s vyšší kapacitou. Druhý případ však nelze prověřit,

protože není známa informace o typech vozidel nasazovaných k obsluze spojů stávajících linek.

### **Kritická analýza pro ranní přepravní špičku pracovního dne v rozmezí 6 – 8 h**

Stručné souhrnné výsledky pro období ranní přepravní špičky byly uvedeny již v podkapitole 7.3. Informace o frekvencích na jednotlivých linkách v období ranní přepravní špičky udává tabulka č. 10.

*Tabulka č. 10 Přehled frekvencí za období ranní přepravní špičky v rozmezí 6 – 8 h*

<b>Ranní přepravní špička v rozmezí 6 - 8 h</b>					
<b>Současné číslo linky</b>	<b>Současný stav</b>	<b>Navržený stav</b>	<b>Současné číslo linky</b>	<b>Současný stav</b>	<b>Navržený stav</b>
<b>01</b>	1.0000	0.0000	<b>21</b>	4.0000	1.2766
<b>03</b>	6.0000	3.2432	<b>22</b>	3.5000	1.0909
<b>04</b>	5.5000	4.8649	<b>24</b>	2.5000	1.0000
<b>05</b>	3.0000	0.0000	<b>26</b>	2.2500	1.0345
<b>06</b>	3.0000	0.0000	<b>27</b>	2.0000	2.0000
<b>07</b>	1.7500	0.8824	<b>29</b>	0.5000	1.0526
<b>14</b>	5.0000	3.1579	<b>30</b>	1.0000	2.7273
<b>16</b>	3.5000	4.8649	<b>31</b>	0.7500	1.0345
<b>20</b>	1.7500	1.2500	<b>44<sup>NN</sup></b>	0.0000	5.8065

Pozn.: 44<sup>NN</sup> představuje nově navrženou linku

Podle navrženého řešení bude v období ranní přepravní špičky ze současných 17 linek provozováno pouze 14 linek a nově navržená linka. Nebudou provozovány linky č. 1, 5, 6 a u devíti linek, konkrétně u linek č. 3, 4, 7, 14, 20, 21, 22, 24 a 26 došlo k poklesu jejich frekvencí.

Co se týče linky č. 1, byly za dané časové období přepravní ranní špičky nejvyšší hodnoty intenzity zjištěny na úsecích Železničná stanica – Žilinská univerzita, dosahující hodnoty 110 cestujících a Železničná stanica – Fatranská, jejíž hodnota činí 86 cestujících. V současném stavu se linka č. 1 vyznačovala frekvencí 1 spoj za hodinu. V úsecích výskytu výše uvedených nejsilnějších proudů, bude č. 1 nahrazena linkou č. 4, jejíž frekvence činí 4,86 spoje za hodiny.

Linka č. 5 nebude v období ranní přepravní špičky rovněž provozována. Zrušení provozu na této lince se dotkne pouze jednoho silného proudu cestujících, a to v úseku Smreková – Polícia s intenzitou 70 cestujících za dané časové období ranní přepravní

špičky. Linka č. 5 bude nahrazena linkou č. 14, která zabezpečí přepravu cestujících na výše zmiňovaném úseku.

V období ranní přepravní špičky nebude v provozu ani linka č. 6, v současnosti spojující velká sídliště Hájik a Vlčince a z velké části projíždějící centrem města. Zrušení provozu na této lince se dotkne silných proudů cestujících v úsecích Matice slovenskej – Polícia s hodnotou intenzity 77 cestujících a Matice slovenskej – Hurbanova s intenzitou 70 cestujících za dané časové období ranní přepravní špičky. Požadavky na přepravu je možno v těchto úsecích pokrýt nově navrženou linkou, jejíž frekvence je 5,8 spojů za hodinu v každém směru.

Co se týče linky č. 3, byla snížena její frekvence z 6 na 3,24. Na uvedené lince se vyskytuje pouze jediný silnější proud a to v úseku Železničná stanica – Rudnayova s intenzitou 66 cestujících za dané období ranní přepravní špičky. Snížení frekvence neovlivní dostatečnou nabídku míst pro cestující na tomto úseku.

Na lince č. 22 došlo ke snížení frekvence spojů, ačkoliv se na úseku Železničná stanica – Bytčica vyskytuje druhý nejsilnější proud s intenzitou 122 cestujících za dané časové období ranní přepravní špičky. Nicméně i za takovýchto okolností budou zajištěny požadavky cestujících na přepravu.

### **Kritická analýza pro ranní přepravní sedlo pracovního dne v rozmezí 8 – 14 h**

Stručné souhrnné výsledky pro období ranního přepravního sedla byly uvedeny již v podkapitole 7.3. Informace o frekvencích na jednotlivých linkách v období ranního přepravního sedla udává tabulka č. 11.

Tabulka č. 11 Přehled frekvencí za období ranního přepravního sedla v rozmezí 8 – 14 h

Ranní přepravní sedlo v rozmezí 8 - 14 h					
Současné číslo linky	Současný stav	Navržený stav	Současné číslo linky	Současný stav	Navržený stav
01	0.8333	0.0000	21	0.8333	1.2766
03	3.1667	3.2432	22	1.1667	1.0909
04	3.3333	3.2432	24	1.1667	1.0000
05	3.0000	1.1321	26	1.0000	1.0345
06	2.2500	0.0000	27	0.6667	1.0000
07	1.0833	0.8824	29	0.1667	1.0526
14	3.8333	4.7368	30	0.5000	2.7273
16	0.4167	1.6216	31	0.3333	1.0345
20	0.9167	1.2500	44 <sup>NN</sup>	0.0000	5.8065

Pozn.: 44<sup>NN</sup> představuje nově navrženou linku.

Podle navrženého řešení bude v období ranního přepravního sedla ze současných 17 linek provozováno pouze 15 linek a nově navržená linka. Nebudou provozovány linky č. 1, 6 a u pěti linek, konkrétně u linek č. 4, 5, 7, 22 a 24, došlo k poklesu jejich frekvencí.

Pro linku č. 1, byly nejvyšší hodnoty intenzit zjištěny na úsecích Železničná stanica – Žilinská univerzita, která dosahuje hodnoty 209 cestujících za dané časové období přepravního ranního sedla a na úseku Železničná stanica – Fatranská, jejíž hodnota činí 106 cestujících za dané časové období ranního přepravního sedla. V současném stavu se i v období ranního přepravního sedla linka č. 1 vyznačovala frekvencí 0,83 spoje za hodinu. V úsecích výskytu výše uvedených nejsilnějších proudů, bude linka č. 1 nahrazena linkou č. 4.

Další linkou, která nebude v ranním přepravním sedle provozována, je linka č. 6. Na lince se vyskytuje pouze jeden silnější proud cestujících, a to v úseku Matice slovenskej – Hurbanova, kde intenzita dosahuje hodnoty 112 cestujících za sedlo, ale požadavky na přepravu je možno z části pokrýt nově navrženou linkou, jejíž frekvence je 5,8 spojů za hodinu v každém směru. Nově navržená linka, která z velké části vede po trase linky č. 6, ale ze zastávky Matice slovenskej (konečná linky č. 6) dále pokračuje na zastávku Fatranskou je schopna pokrýt i požadavky na přepravu i v úseku Železničná stanica – Fatranská s intenzitou 106 cestujících v sedle.

Na úsecích linek č. 4, 7 a 24, u nichž došlo v období ranního přepravního sedla k nepatrnému snížení frekvence spojů, se nenacházejí žádné silnější proudy cestujících.

### Kritická analýza pro odpolední přepravní špičku pracovního dne v rozmezí 14 – 17 h

Stručné souhrnné výsledky pro období odpolední špičky byly uvedeny již v podkapitole 7.3. Informace o frekvencích na jednotlivých linkách v období odpolední přepravní špičky udává tabulka č. 12.

Tabulka č. 12 Přehled frekvencí za období odpolední přepravní špičky v rozmezí 14 – 17 h

Odpolední přepravní špička v rozmezí 14 -17 h					
Současné číslo linky	Současný stav	Navržený stav	Současné číslo linky	Současný stav	Navržený stav
01	1.0000	0.0000	21	2.6667	1.2766
03	5.3333	3.2432	22	3.3333	1.0909
04	5.3333	3.2432	24	2.6667	1.0000
05	3.0000	0.0000	26	2.1667	1.0345
06	2.0000	0.0000	27	1.0000	1.0000
07	2.1667	0.8824	29	0.8333	1.0526
14	5.6667	3.1579	30	0.6667	2.7273
16	3.0000	4.8649	31	0.8333	1.0345
20	1.8333	1.2500	44 <sup>NN</sup>	0.0000	5.8065

Pozn.: 44<sup>NN</sup> představuje nově navrženou linku

Podle navrženého řešení bude v období odpolední přepravní špičky ze současných 17 linek provozováno pouze 14 linek a nově navržená linka. Nebudou provozovány linky č. 1, 5 a 6, u devíti linek, konkrétně u linek č. 3, 4, 7, 14, 20, 21, 22, 24, 26 došlo k poklesu jejich frekvencí.

Co se týče linky č. 1, byla nejvyšší hodnota intenzity zjištěna na úseku Hurbanova – Matice slovenskej, dosahující hodnoty 106 cestujících za dané časové období přepravní odpolední špičky a na úseku Železničná stanica – Matice slovenskej, jejíž hodnota činí 82 cestujících za dané časové období přepravní odpolední špičky a Polícia – Matice slovenskej, která má hodnotu 73. V současném stavu se linka č. 1 vyznačovala frekvencí 1 spoj za hodinu. Ve všech úsecích výskytu výše uvedených nejsilnějších proudů, bude linka č. 1 nahrazena nově navrženou linkou, v úseku Mostná – Žilinská univerzita zajistí obsluhu linka č. 4 s frekvencí 3,24 spoje za hodinu.

Linka č. 5 nebude v období odpolední přepravní špičky rovněž provozována. Nedá se očekávat, že zrušení provozu na této lince se dotkne většího počtu cestujících, protože se

na její trase neobjevují přepravní proudy s významnější intenzitou. Obsluhu úseků linky č. 5 zabezpečí linky jiné, a to následovně: na úseku Spanyolova, nemocnice – Fatranská to bude nově navržená linka.

Další linkou, která nebude v odpolední přepravní špičce provozována, je linka č. 6. Na lince se sice vyskytují dva silnější proudy cestujících, a to v úsecích Hurbanova - Matice slovenskej, kde intenzita dosahuje hodnoty 106 cestujících za špičku a Železničná stanica – Matice slovenskej s intenzitou 82 cestujících za špičku, ale požadavky na přepravu je možno z části pokrýt nově navrženou linkou, jejíž frekvence je 5,8 spojů za hodinu v každém směru.

U linky č. 4 se v navrženém řešení snižuje frekvence z 5,33 na 3,24. Po části trasy je paralelně provozována nově navržená linka, která má možnost zajistit obsluhu i na úseku s nejvyšší hodnotou intenzity Železničná stanica – Matice slovenskej, na kterém činí hodnota intenzity 82 cestujících za špičku.

U linky č. 7 se v navrženém řešení snižuje frekvence z 2,17 na 0,88, což nezpůsobí významné komplikace, protože se v odpolední přepravní špičce na její trase nevyskytují žádné významnější proudy cestujících.

### **Kritická analýza pro víkendový den v rozmezí 4 – 23 h**

Stručné souhrnné výsledky pro období odpolední špičky byly uvedeny již v podkapitole 7.3. Informace o frekvencích na jednotlivých linkách v období víkendového dne udává tabulka č. 13.

*Tabulka č. 13 Přehled frekvencí za období víkendového dne v rozmezí 4 – 23 h*

<b>Víkendový den v rozmezí 4 -23 h</b>					
<b>Současné číslo linky</b>	<b>Současný stav</b>	<b>Navržený stav</b>	<b>Současné číslo linky</b>	<b>Současný stav</b>	<b>Navržený stav</b>
<b>01</b>	0.0000	0.0000	<b>21</b>	0.3158	1.2766
<b>03</b>	2.4737	3.2432	<b>22</b>	0.9474	1.0909
<b>04</b>	2.5789	6.4865	<b>24</b>	0.7895	1.0000
<b>05</b>	1.6316	0.0000	<b>26</b>	0.6316	0.0000
<b>06</b>	1.2789	0.0000	<b>27</b>	0.5526	1.0000
<b>07</b>	0.3158	0.0000	<b>29</b>	0.4211	1.0526
<b>14</b>	2.5789	4.7368	<b>30</b>	0.3947	2.7273
<b>16</b>	1.1053	6.4865	<b>31</b>	0.1053	1.0345
<b>20</b>	0.0000	0.0000	<b>44<sup>NN</sup></b>	0.0000	5.8065

Pozn.: 44<sup>NN</sup> představuje nově navrženou linku

Podle navrženého řešení bude ve víkendových dnech ze současných 15 linek provozováno pouze 11 stávajících linek a nově navržená linka. Nebudou provozovány linky č. 1, 5, 6, 7, 20 a 26. Skutečný pokles počtu linek provozovaných v současnosti však nebude 6, ale pouze čtyři, protože linky číslo 1 a 20 nejsou o víkendových dnech v provozu ani v současnosti.

Co se týče významných přepravních proudů, které linka č. 5 obsluhuje, nejvyšší intenzita byla zjištěna pro úsek Limbová – Matice slovenskej, který činí 104 cestujících za dané časové období víkendového dne (což představuje průměrně 6 cestujících za hodinu). Hodinová intenzita klesla pod mezní intenzitu rozhodující pro podrobnější analýzu dopadů změn ve vedení linek.

Analogická situace nastává u linky č. 6. Uvedená linka je sice v současnosti vedena centrem města a spojuje významná sídliště Hájik a Vlčince nacházející se na periférii města, nicméně nejvýznamnější dva proudy cestujících v úsecích Hurbanova - Matice slovenskej s intenzitou 102 cestujících za časové období víkendového dne a Železničná stanica – Matice slovenskej s intenzitou 172 za období víkendového dne nedosahují po přepočtu na hodiny hodnoty mezní intenzity pro provádění podrobné kritické analýzy. V případě, že linka nebude provozována, zajišťuje přepravu na obou dvou úsecích nově navržená linka.

Podle navrženého řešení nebude provozována ani autobusová linka č. 26, na jejíž trase se nevyskytují žádné významné přepravní proudy cestujících z hlediska intenzity. Všechny významnější přepravní proudy, které by linka mohla obsluhovat, je schopna obsloužit nově navržená linka.

#### *Závěrečné zhodnocení*

Z výše uvedených experimentů je patrné, že linkám číslo 1 a 6 nebyla ve zkoumaných obdobích přidělena žádná vozidla, tudíž linky podle navrhovaných řešení nebudou provozovány. Zájem o přepravu v proudech obsluhovaných uvedenými dvěma linkami musí být pokryt podle navrženého řešení linkami jinými.

Linka č. 5 bude podle navrhovaného řešení provozována pouze v období ranního přepravního sedla a linka č. 7 bude provozována v období ranního přepravního sedla a odpolední přepravní špičky.



Naopak u tří linek (č. 29, 30 a 31) došlo ke zvýšení frekvencí během všech výše uvedených časových období.

Intenzivně bude provozována nově navržená linka (označena jako 44<sup>NN</sup>), které v každém ze zkoumaných období byla přidělena frekvence 5,8 spojů za hodinu.

### **7.5 Analýza průběhu výpočetních experimentů**

V rámci vyhodnocení výpočetních experimentů byla pozornost rovněž věnována průběhu hodnot tolerancí mezi frekvencemi linek v rámci jednotlivých iterací. Získané hodnoty budou pro jednotlivá období prezentovány v tabulkách č. 14 – 17.

V prvním sloupci je identifikační číslo provozované linky při současném stavu, resp. označení nově navržené linky, druhý sloupec představuje hodnoty frekvencí u jednotlivých linek v současném stavu, další sloupce představují hodnoty frekvencí získané při jednotlivých iteračních krocích a poslední sloupec konečnou toleranci. Konečnými tolerancemi se rozumí rozdíly mezi hodnotami frekvencí spojů na jednotlivých linkách při provedení posledních dvou iterací.

Proces konvergence pro období ranní přepravní špičky je uveden v následující tabulce č. 14.

*Tabulka č. 14 Proces konvergence navrženého algoritmu pro období ranní přepravní špičky 6 – 8 h*

Proces konvergence navrženého algoritmu pro období ranní přepravní špičky v rozmezí 6 - 8 h							
Současné číslo linky	Současný stav	1. krok iterace	2. krok iterace	3. krok iterace	4. krok iterace	5. krok iterace	Konečná tolerance
01	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
03	6.0000	4.8649	4.8649	3.2432	3.2432	3.2432	0.0000
04	5.5000	1.6216	1.6216	3.2432	4.8649	4.8649	0.0000
05	3.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
06	3.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
07	1.7500	0.8824	1.7647	0.8824	0.8824	0.8824	0.0000
14	5.0000	1.5790	1.5790	3.1579	3.1579	3.1579	0.0000
16	3.5000	1.6216	1.6216	3.2432	4.8649	4.8649	0.0000
20	1.7500	1.2500	1.2500	1.2500	1.2500	1.2500	0.0000
21	4.0000	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766	0.0000
22	3.5000	1.0909	1.0909	1.0909	1.0909	1.0909	0.0000
24	2.5000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
26	2.2500	1.0345	1.0345	1.0345	1.0345	1.0345	0.0000
27	2.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
29	0.5000	1.0526	1.0526	1.0526	1.0526	1.0526	0.0000
30	1.0000	2.7273	2.7273	2.7273	2.7273	2.7273	0.0000
31	0.7500	1.0345	1.0345	1.0345	1.0345	1.0345	0.0000
44 <sup>NN</sup>	0.0000	7.7419	5.8065	5.8065	5.8065	5.8065	0.0000

Jak je z výše uvedené tabulky patrné, v případě ranní přepravní špičky pracovního dne bylo v rámci výpočetního experimentu provedeno celkem pět iterací. Výsledné hodnoty tolerancí nabyly po provedení pěti iterací nulových hodnot. K poklesu tolerancí pod stanovenou mez 10% je zapotřebí provést všech pět iterací.

Proces konvergence pro období ranního přepravního sedla je uveden v následující tabulce č. 15.

*Tabulka č. 15 Proces konvergence navrženého algoritmu pro období ranního přepravního sedla 8 – 14 h*

Proces konvergence navrženého algoritmu pro období ranního přepravního sedla v rozmezí 8 - 14 h						
Současné číslo linky	Současný stav	1. krok iterace	2. krok iterace	3. krok iterace	4. krok iterace	Konečná tolerance
01	0.8333	2.3077	3.4615	0.0000	0.0000	0.0000
03	3.1667	1.6216	3.2432	3.2432	3.2432	0.0000
04	3.3333	1.6216	1.6216	3.2432	3.2432	0.0000
05	3.0000	2.2642	2.2642	1.1321	1.1321	0.0000
06	2.2500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
07	1.0833	0.8824	1.7647	0.8824	0.8824	0.0000
14	3.8333	1.5790	1.5790	4.7368	4.7368	0.0000
16	0.4167	0.0000	0.0000	1.6216	1.6216	0.0000
20	0.9167	1.2500	2.5000	1.2500	1.2500	0.0000
21	0.8333	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766	0.0000
22	1.6667	3.2727	2.1818	1.0909	1.0909	0.0000
24	1.1667	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
26	1.0000	2.0690	2.0690	1.0345	1.0345	0.0000
27	0.6667	3.0000	5.0000	1.0000	1.0000	0.0000
29	0.1667	1.0526	1.0526	1.0526	1.0526	0.0000
30	0.5000	2.7273	2.7273	2.7273	2.7273	0.0000
31	0.3333	1.0345	2.0690	1.0345	1.0345	0.0000
44 <sup>NN</sup>	0.0000	3.8710	3.8710	5.8065	5.8065	0.0000

Jak je z výše uvedené tabulky patrné, v případě ranního přepravního sedla pracovního dne byly v rámci výpočetního experimentu provedeny celkem čtyři iterace. Výsledné hodnoty tolerancí nabyly po provedení čtyř iterací nulových hodnot. K poklesu tolerancí pod stanovenou mez 10% je zapotřebí provést všechny čtyři iterace.

Proces konvergence pro období odpolední přepravní špičky je uveden v tabulce č. 16.

*Tabulka č. 16 Proces konvergence navrženého algoritmu pro období odpolední přepravní špičky 14 – 17 h*

<b>Proces konvergence navrženého algoritmu pro období odpoledního přepravního sedla v rozmezí 14 - 17 h</b>				
<b>Současné číslo linky</b>	<b>Současný stav</b>	<b>1. krok iterace</b>	<b>2. krok iterace</b>	<b>Konečná tolerance</b>
01	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
03	5.3333	3.2432	3.2432	0.0000
04	5.3333	3.2432	3.2432	0.0000
05	3.0000	0.0000	0.0000	0.0000
06	2.0000	0.0000	0.0000	0.0000
07	2.1667	0.8824	0.8824	0.0000
14	5.6667	3.1579	3.1579	0.0000
16	3.0000	4.8649	4.8649	0.0000
20	1.8333	1.2500	1.2500	0.0000
21	2.6667	1.2766	1.2766	0.0000
22	3.3333	1.0909	1.0909	0.0000
24	2.6667	1.0000	1.0000	0.0000
26	2.1667	1.0345	1.0345	0.0000
27	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
29	0.8333	1.0526	1.0526	0.0000
30	0.6667	2.7273	2.7273	0.0000
31	0.8333	1.0345	1.0345	0.0000
44 <sup>NN</sup>	0.0000	5.8065	5.8065	0.0000

Jak je z výše uvedené tabulky patrné, v případě odpolední přepravní špičky pracovního dne byly v rámci výpočetního experimentu provedeny celkem dvě iterace. Výsledné hodnoty tolerancí nabyly po provedení dvou iterací nulových hodnot. K poklesu tolerancí pod stanovenou mez 10% bylo však zapotřebí provést obě iterace.

Proces konvergence pro období víkendového dne je uveden v tabulce č. 17.

*Tabulka č. 17 Proces konvergence navrženého algoritmu pro období víkendového dne 4 – 23 h*

Proces konvergence navrženého algoritmu pro období víkendového dne v rozmezí 4 - 23 h							
Současné číslo linky	Současný stav	1. krok iterace	2. krok iterace	3. krok iterace	4. krok iterace	5. krok iterace	Konečná toleranc
01	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
03	2.4737	3.2432	3.2432	3.2432	3.2432	3.2432	0.0000
04	2.5789	4.8649	6.4865	4.8649	6.4865	6.4865	0.0000
05	1.6316	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
06	1.2789	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
07	0.3158	0.0000	0.8824	0.8824	0.0000	0.0000	0.0000
14	2.5789	4.7368	4.7368	4.7368	4.7368	4.7368	0.0000
16	1.1053	4.8649	4.8649	4.8649	6.4865	6.4865	0.0000
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.3158	0.3158	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766	0.0000
22	0.9474	1.0909	1.0909	1.0909	1.0909	1.0909	0.0000
24	0.7895	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
26	0.6316	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27	0.5526	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
29	0.4211	1.0526	1.0526	1.0526	1.0526	1.0526	0.0000
30	0.3947	2.7273	2.7273	2.7273	2.7273	2.7273	0.0000
31	0.1053	1.0345	1.0345	1.0345	1.0345	1.0345	0.0000
44 <sup>NN</sup>	0.0000	5.8065	5.8065	7.7419	5.8065	5.8065	0.0000

Jak je z výše uvedené tabulky patrné, v případě víkendového dne bylo v rámci výpočetního experimentu provedeno celkem pět iterací. Výsledné hodnoty tolerancí nabyly po provedení pěti iterací nulových hodnot. K poklesu tolerancí pod stanovenou mez 10% je zapotřebí provést všech pět iterací.

## 7.6 Ekonomické aspekty změn ve vedení linek MHD

### Základní obecné úvahy

Při rozhodování o celkové výši nákladů souvisejících s provozem linkové sítě MHD musí dopravce přihlížet k mnoha faktorům. Aby bylo možno posoudit, které z navržených faktorů jsou pro provoz MHD nejdůležitější, je třeba stanovit kritéria, podle kterých bude výhodnost jednotlivých řešení posuzována. Problémem je však to, že každý ze subjektů, který přichází do styku s MHD, preferuje jiné kritérium. Jinými slovy je třeba říci, že pro cestujícího jsou důležitá jiná kritéria (s odlišnými typy nákladů, jako např. cena jízdného) než kritéria preferovaná dopravcem (náklady spojené s provozem vozidel, osobními

náklady řidičů, apod.). Do skupiny kritérií, která považuje cestující veřejnost za nejdůležitější, patří doba za přemístění a pohodlí přemístění, kritériem z pohledu dopravce jsou náklady na zajištění provozu. Společným kritériem pro oba subjekty vstupující do rozhodování o celkové výši nákladů souvisejícím s provozem linkové sítě MHD jsou tzv. kritéria společenská, která preferují jak cestující, tak i provozovatel (viz. kapitola č. 2). Je patrné, že finanční stránka je z pohledu jednotlivých subjektů často vzájemném rozporu a je třeba mezi nimi hledat vhodný kompromis. Vhodně zvoleným kompromisem mezi výší nákladů na zajištění provozu a cenou jízdného může být následně dosaženo na jednu stranu ne příliš dotačně náročné a na stranu druhou akceptovatelné služby.

Obecně platí, že pro ekonomické posouzení navrhovaných změn bude rozhodující posouzení celkových nákladů na provoz MHD před a po realizaci navržených změn vztahmo k celkovým přínosům měřeným např. nárůstem tržeb od cestujících. Ideálním případem je samozřejmě stav, kdy se realizací navržených změn podaří dosáhnout snížení celkových nákladů na provoz a současně i zvýšení tržeb.

Celkové náklady obsahují jak náklady nepřímé (zejména investiční), tak náklady přímé, které bezprostředně souvisejí s dopravními výkony. Pokud nedochází k významným změnám v oblasti nepřímých nákladů (např. investic), jsou pro ekonomickou analýzu dopravního procesu a hledání jeho optimální varianty vhodné přímé náklady. Výše přímých nákladů může mít pochopitelně vliv i na výši nákladů nepřímých, zejména v situacích, kdy jsou nepřímé náklady kalkulovány v závislosti na nákladech přímých (např. počet administrativních zaměstnanců je určován v závislosti na počtech řidičů, či jiných provozních zaměstnanců, počet opravárenských linek je dimenzován v závislosti na počtu provozovaných vozidel).

Pro posouzení vhodnosti způsobu řešení dopravy z ekonomického hlediska se používají především náklady přepočítané na jednotku dopravního výkonu. Cílem je, aby tyto náklady byly co nejnižší při zachování všech kvalitativních atributů přepravy, tj. doby a rychlosti přemísťování, bezpečnosti dopravy, přepravní příležitosti, spolehlivosti a přesnosti, pohodlí přemístění, informovanosti a vlivů na životní prostředí.

### **Aplikace obecných úvah v podmínkách DPMŽ**

Jak již bylo uvedeno v obecném úvodu k ekonomickému hodnocení navržených úprav ve vedení sítě linek MHD, jsou komparačním kritériem celkové náklady provozu. Jsou-li

změny ve vedení linek čistě organizační záležitostí, lze se při hodnocení efektivity navržených opatření omezit pouze na náklady přímé. Tak tomu je i v případě navrhovaných změn v síti linek MHD v Žilině, protože změny ve vedení linek nevyžadují investičně náročné aktivity (budování trakčního vedení pro provoz trolejbusové dopravy, nákup dalších vozidel apod.). Náklady, prostřednictvím kterých je možno ekonomické aspekty navržených úprav linkové sítě MHD hodnotit vycházejí z předpokládaných dopravních výkonů přepočítaných na přímé náklady a nákladů na zajištění provozuschopného vozidlového parku.

Protože vykalkulované hodnoty provozních nákladů jsou u jednotlivých provozovatelů MHD předmětem obchodního tajemství, bude se ekonomická úvaha omezovat pouze na rámcové srovnání dopravních výkonů nebo jiných veličin (počet provozovaných vozidel), které mohou být jednoduchým přepočtem na náklady následně převedeny. Je-li třeba vypočítat celkové přímé náklady plynoucí z navrženého dopravního výkonu, postupuje se tak, že se vypočítá součin celkového navrženého dopravního výkonu (uvedeného ve výsledném řešení pro dané časové období) a hodnoty přímých nákladů na jeden kilometr provozu (obsahující všechny položky související s přímými náklady).

Jak již bylo uvedeno v předcházejícím odstavci, uvedený dopravní výkon však nemusí být jedinou veličinou, prostřednictvím které je možno posuzování efektivity navrženého řešení provádět. Dalším důležitým kritériem může být celková potřeba vozidel, resp. počet provozovaných vozidel v daném časovém období. Nižší počet dopravních prostředků, které může dopravní podnik k zabezpečení plánovaných výkonů použít, představuje i úsporu v několika dalších oblastech. V první řadě se jedná o úsporu v personální oblasti, není zapotřebí takového množství řidičů (je-li počet řidičů dimenzován podle počtu vozidel), pracovníků údržby vozidel a je-li počet administrativních pracovníků provázán s počtem řidičů, dojde i ke snížení počtu pracovníků administrativy. Dále se sníží výše nákladů souvisejících s udržováním vozidel v provozuschopném stavu, odpisů a pojištění vozidel, příp. technické základny potřebné k zabezpečení jejich provozuschopného stavu apod.

Je však nutné uvést, že pokud nebudou k dispozici dostatečně přesné údaje, bude se jednat o velice hrubý odhad skutečnosti. Přesto musela být tato kapitola doplněna, a to na základě připomínek vznesených na interní obhajobě disertační práce. Protože nebyly k dispozici údaje požadované v modelu, jsou níže uvedené výpočty realizovány alespoň na základě kumulativních údajů uveřejněných v dokumentu [45].

## Postup konkrétní kalkulace

1. výběr srovnávacího období,
2. kalkulace nákladů na realizovaný a navržený dopravní výkon,
3. zjištění výše uspořené finančních prostředků.

Jako srovnávací období bude vybrán měsíc březen 2010. Na základě struktury nákladů zveřejněných v dokumentu [45], budou vykalkulovány náklady na jeden kilometr jízdy vozidel. Na základě vykalkulovaných jednotkových nákladů z realizovaného a navrženého dopravního výkonu budou zjištěny celkové náklady vynaložené na realizaci současného i navrženého stavu.

Celkové náklady společnosti za rok 2009 činily 8 681 285 €. Pro provedení kalkulace bude vycházeno z následujících kategorií nákladů. Náklady na materiál 1 361 985 €, náklady na energie 795 450 €, náklady na opravy a udržování 249 048 €, osobní náklady 3 946 843 €, odpisy majetku 1 553 630 € a ostatní náklady 294 287 €. Z nákladových položek vyjmenovaných v dokumentu [45] jsou vynechávány náklady zahrnuté do položek tvorba a zúčtování OP k zásobám a náklady na služby. Podíl vynechaných nákladových položek na celkových nákladech společnosti činil 5,52 %. Z dokumentu dále vyplynulo, že za rok 2009 byl vozidly dopravce realizován dopravní výkon ve výši 3 488 tis.km. Všechny údaje však budou v ekonomickém zhodnocení důležité pro vyčíslení hodnot poměrových ukazatelů, v tomto případě. Přímých provozních nákladů na 1 km výkonu. Dopravní podnik k 31. 12. 2009 zaměstnával 272 zaměstnanců, z toho 137 řidičů (69 řidičů autobusů a 68 řidičů trolejbusů, 82 zaměstnanců v dělnických profesích a 53 administrativních zaměstnanců. Ve vozidlovém parku je zařazeno 90 vozidel.

Do dopravního výkonu MHD Žilina není pro potřeby ekonomického zhodnocení zahrnut dopravní výkon realizovaný v roce 2009 v rámci nepravidelné zájezdové dopravy, který činí 419 tis. km.

Na základě struktury nákladů zveřejněných ve výroční zprávě byly vykalkulovány náklady na jeden kilometr jízdy vozidel, které jsou uvedeny v tabulce č. 18.



Tabulka č. 18 Výše provozních nákladů na 1 km při zohlednění různých rozsahů nákladových položek

Ukazatel	Hodnota ukazatele
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba) na 1 km	0,69 €·km <sup>-1</sup>
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba + osobní náklady počítány za řidiče) na 1 km	1,26 €·km <sup>-1</sup>
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba + celkové osobní náklady) na 1 km	1,82 €·km <sup>-1</sup>
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba + celkové osobní náklady + odpisy) na 1 km	2,27 €·km <sup>-1</sup>
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba + celkové osobní náklady + odpisy + ostatní náklady) na 1 km	2,35 €·km <sup>-1</sup>

Tabulka č. 19 Výpočet celkového dopravního výkonu pro pracovní den v březnu 2010

Časové rozmezí v [h]	Hodnota výkonu navrženého [voz.km]	Hodnota výkonu při současném stavu [voz.km]
4 <sup>00</sup> – 5 <sup>00</sup>	58,25	57,45
5 <sup>00</sup> – 6 <sup>00</sup>	180,95	324,47
6 <sup>00</sup> – 8 <sup>00</sup>	361,9	648,94
8 <sup>00</sup> – 14 <sup>00</sup>	349,5	344,7
14 <sup>00</sup> – 17 <sup>00</sup>	345,6	599,42
17 <sup>00</sup> – 23 <sup>00</sup>	349,5	344,7
<b>Celkem 4<sup>00</sup> – 23<sup>00</sup></b>	<b>1645,7</b>	<b>2319,68</b>

Při kalkulaci dopravního výkonu bylo vycházeno z kapitoly 7.2.1, kdy byl pomocí matematického modelu optimalizován celkový dopravní výkon.

Ve výše uvedené tabulce jsou zaznamenány hodnoty výkonů pro časová období pracovního dne. Pracovní den je rozčleněn na několik úseků (období před ranní přepravní špičkou 4<sup>00</sup> až 6<sup>00</sup>, období ranní přepravní špičky 6<sup>00</sup> až 8<sup>00</sup>, období dopoledního přepravního sedla 8<sup>00</sup> až 14<sup>00</sup>, období odpolední přepravní špičky - 14<sup>00</sup> až 17<sup>00</sup> a období po odpoledním přepravním sedle).

Období pracovního dne, pro které byla optimalizace prováděna, má však pouze rozsah od 6<sup>00</sup> do 17<sup>00</sup>. Pro kalkulaci výše dopravního výkonu v období pracovního dne v rozmezí 4<sup>00</sup> až 6<sup>00</sup> a 17<sup>00</sup> až 23<sup>00</sup> hodin byly použity následující úvahy. Časový interval 4<sup>00</sup> až 5<sup>00</sup> byl považován za období, ve kterém nastává poptávka po přepravě s intenzitou

odpovídající intenzitě přepravní poptávky za hodinu dopoledního přepravního sedla. Tomu odpovídá i potřebný hodinový dopravní výkon, jehož výše se vypočítala jako podíl celkového dopravního výkonu za dopolední přepravní sedlo a počtu hodin, po které přepravní sedlo trvá. Časový interval 5<sup>00</sup> až 6<sup>00</sup> byl považován za období, ve kterém nastává poptávka po přepravě s intenzitou odpovídající intenzitě přepravní poptávky za hodinu ranní přepravní špičky. Hodnota potřebného výkonu se vypočítala jako podíl celkového dopravního výkonu za období ranní přepravní špičky a počtu hodin, po které ranní přepravní špička trvá. Analogicky byla stanovena hodnota dopravního výkonu pro časové období 17<sup>00</sup> až 23<sup>00</sup> hodin pracovního dne jako hodnota, která odpovídá odpolednímu přepravnímu sedlu.

*Tabulka č. 20 Výpočet celkového dopravního výkonu pro víkendový den v březnu 2010*

<b>Časové rozmezí v [h]</b>	<b>Hodnota výkonu navrženého [voz.km]</b>	<b>Hodnota výkonu při současném stavu [voz.km]</b>
4 <sup>00</sup> – 23 <sup>00</sup>	330,6	203,97

Podle plánovacího kalendáře bylo v měsíci březnu roku 2010 na území Slovenské republiky 23 pracovních dní a 8 dní, které nebyly pracovními dny (soboty, neděle).

*Tabulka č. 21 Celkový dopravní výkon za březen roku 2010*

<b>Hodnoty výkonů pro měsíc březen 2010</b>	
Současný stav	54 984,4 voz.km
Navržené řešení	40 495,9 voz.km

Jak je z tabulky č. 21 patrné, došlo by při realizaci navržených opatření za měsíc březen roku 2010 k úspoře 14 488,5 voz.km, což představuje úsporu 26,35% v porovnání se stavem, který je označován jako současný.

Je-li uvažováno s provozními náklady na jeden kilometr podle tabulky č. 18, budou úspory v peněžních prostředcích dosahovat hodnot uvedených v tabulce č. 22.

*Tabulka č. 22 Úspora finančních prostředků z uspořeného dopravního výkonu  
v navrhovaném řešení za měsíc březen 2010*

<b>Ukazatel</b>	<b>Uspořené finanční prostředky</b>
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba)	9 997,10 €
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba + osobní náklady počítány za řidiče)	18 255,51 €
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba + celkové osobní náklady)	26 396,10 €
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba + celkové osobní náklady + odpisy)	32 888,90 €
Náklady (materiál + energie + opravy a údržba + celkové osobní náklady + odpisy + ostatní náklady)	34 047,98 €

Úspory v nákladech vyčíslené v posledních dvou řádcích tabulky č. 22 budou pochopitelně nižší, protože v odpisech jsou zahrnuty odpisy všech odepisovaných položek majetku (nikoliv pouze vozidel). V následujícím odstavci bude tedy alespoň proveden odhad kalkulace úspory v oblasti odpisů týkajících se vozidel.

V současném stavu je ve vozidlovém parku zapotřebí 37 vozidel (opět vztaženo k položce současný stav pro březen 2010 v tab. č. 21), v navrženém stavu bude zapotřebí 23 vozidel. Uvedené počty vozidel je nutno zvýšit o určitou zálohu pro případy plánovaných i neplánovaných oprav. K řešení tohoto problému je možno využít např. teorie hromadné obsluhy, konkrétně uzavřený systém hromadné s rezervou [46]. Vstupními údaji jsou intenzita poruch, kapacita opravárenského provozu a počet vozidel potřebných k zajištění výkonu. Výsledkem výpočtu je stanovení minimálního počtu rezervních vozidel v závislosti na požadované pravděpodobnosti zachování provozuschopného počtu vozidel (vozidel potřebných k realizaci naplánovaného výkonu).

Protože nejsou známy další informace potřebné k vyčíslení úspor v oblastech dimenzování technické základny pro zabezpečení provozuschopnosti vozidlového parku, bude pozornost soustředěna pouze na úspory v oblasti odpisů. Podle výroční zprávy [45] za rok 2009 činí výše odpisů 1 553 630 €. Průměrné odpisy připadající na jedno vozidlo tak činí 17 262,56 € za rok 2009. Uvedená hodnota je pochopitelně výrazně zkreslená, protože v položce odpisy jsou určitě zahrnuty nejenom odpisy vozidel, ale i odpisy veškerého odpisovaného majetku, který dopravce vlastní. Protože ve výroční zprávě není k dispozici ani procento podílu jednotlivých položek v majetku, nelze stanovit přesnější hodnotu. Pro výpočty v oblasti úspor z odpisů je tedy uvažováno s částkou 17 262,56

€/vozidlo<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>. Celková úspora vozidel činí 14 vozidel, což by přineslo snížení výše nákladů v položce odpisy o částku 241 676 €.14vozidel<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> a za měsíc březen 2010 by činila 20 526 €.14vozidel<sup>-1</sup>. Úsporu vozidel je pochopitelně nutné snížit o stanovenou zálohu vypočítanou např. postupem zmíněným výše. V důsledku uvedené skutečnosti dojde také k navýšení výše odpisů za vozidla opětovně zařazené do vozidlového parku za účelem vytvoření rezervy, tedy snížení vykalkulované úspory v oblasti odpisů.

Přínosy navrženého řešení lze dále spatřovat i z pohledu dělby přepravní práce. Vlivem zavedených opatření může dojít ke zvýšení atraktivity městské hromadné dopravy pro část obyvatel dosud využívajících ke svým cestám individuální automobilovou dopravu, může dojít ke zvýšení přepravní poptávky po službách dopravce a bude-li dopravní podnik na zvýšenou poptávku adekvátně reagovat, může dojít také ke zvýšení tržeb a následně také ke snížení dotační náročnosti městské hromadné dopravy. Souběžně s tím může dojít také k dalším efektům, jako je snížení objemu produkovaných emisí na území města Žiliny, snížení nežádoucích jevů dopravy ve městech, jako jsou kongesce uvnitř města a dalších úspor v dobách přepravy. Snížení intenzity individuální automobilové dopravy může přinést zvýšení oběžné rychlosti na linkách, z čehož plyne další zefektivňování provozu MHD (nižší potřeba vozidel, nižší počet řidičů potřebných pro zvládnutí přepravní poptávky apod.). Je však nutno si uvědomit, že pokud by k uvedenému pozitivnímu jevu došlo, i jeho meze jsou limitovány. Jistou část obyvatelstva totiž k používání MHD nepřesvědčí ani vysoce kvalitní služby poskytované dopravním podnikem.

## 8. PŘEHLED PŘÍNOSŮ PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Řešený problém je zkoumán od poloviny 60. let minulého století. V minulosti byla vyvinuta celá řada přístupů, řešené přístupy však byly převážně přístupy jednokriteriálními, v omezené míře se objevují přístupy, při kterých se optimalizuje více kritérií. Exaktní přístupy buď zpravidla nebyly zkoumány na sítích reálných rozsahů, nebo pouze na sítích odpovídajících městům odpovídajícím velikosti okresních měst. Důvody lze spatřovat zejména v tom, že existuje malá propojenost mezi pracovišti zabývajícími se výzkumem a pracovišti, která v praxi návrhy, resp. úpravy sítí linek navrhuji či realizují.

První významný přínos modelů navržených v předložené práci lze spatřovat v tom, že se jedná o modely vícekriteriální, což je významné zejména proto, že problematiku návrhu sítě linek MHD je možno za jednokriteriální problém považovat zřídka. Při návrhu je přihlíženo k potřebám všech zúčastněných subjektů, cestujících i dopravce, které bývají často protichůdné, což modely jednokriteriální nedokáží zohlednit.

Základní kostra modelů navržených v předložené práci vyplynula z modelu PRIVOL, který byl rozpracován na podmínky heterogenního vozidlového parku. Navržený model obsahuje soustavu omezujících podmínek, která zajišťuje v praxi zpravidla požadované omezení, že každá z provozovaných linek bude obsluhována právě jedním druhem dopravního prostředku. Navržený postup řešení je kombinací exaktního algoritmu pro řešení matematického modelu a heuristické metody, jejichž cílem je přizpůsobit výsledky modelu (vypočítanou soustavu linek a jejich frekvence) očekávanému chování cestujících. V této souvislosti bylo s řešením problému využito poznatků obecné teorie užitku, která dosud nebyla, alespoň podle poznatků autora práce, s matematickými přístupy zkombinována.

Navržené matematické modely jsou lineární, tudíž jsou poměrně snadno řešitelné i pro praktický rozsah úloh. Navíc softwarové produkty umožňující řešit úlohy lineárního programování jsou na trhu v široké míře a často i volně dostupné.

V rámci řešení byl sestaven univerzální program v programovacím jazyku MOSEL, který je možno použít při navrhování sítě linek jakéhokoliv města a taktéž bylo prokázáno, že optimalizační software Xpress-IVE, ve kterém bylo řešení navržených modelů provedeno, je schopen svými parametry pokrýt nároky optimalizačního výpočtu problému reálného rozsahu odpovídajícího velikosti krajského města v dostatečně krátké době.

Neocenitelné informace o využitelnosti modelu jak z hlediska praktického uplatnění, tak i z hlediska publikačních výstupů přináší aplikace na konkrétní síť linek. V předložené práci byly provedeny experimenty na existující síti linek MHD Žilina, do které byla zařazena i další, dosud neexistující, linka, jejíž smysluplnost byla řešením navrženého modelu prokázána, a která umožní zvýšit efektivitu celého systému linek. Realizace návrhu na základě získaných údajů tak umožňuje významně přispět ke zkvalitnění služeb dopravce zajišťujícího městskou hromadnou dopravu v Žilině.

## 9. MOŽNOSTI POKRAČOVÁNÍ V ŘEŠENÍ UVEDENÉ PROBLEMATIKY

V žádném případě nelze považovat řešení uvedené problematiky za ukončené, protože se jedná o rozsáhlou problematiku. V souvislosti s předloženým návrhem vyvstala celá řada otázek, na které je v budoucnu zapotřebí hledat odpovědi, a které vyžadují dlouhodobější a systematický výzkum. Namátkově lze uvést tyto oblasti:

- testování vhodnosti dalších metod vícekritériální optimalizace pro potřeby návrhu sítě linek a komparace jejich výsledků,
- rozšíření matematického modelu pro všechna kvantifikovatelná kritéria se vztahem k návrhu sítě linek,
- zdokonalení a další modifikace navržených matematických modelů v oblasti soustavy omezujících podmínek, a to na základě poznatků získaných při řešení jiných sítí linek městské hromadné dopravy pomocí modelů sestavených v předložené disertační práci,
- možnosti kombinace exaktních a heuristických přístupů založených ať již na bázi klasických heuristik nebo využívajících metod umělé inteligence a evolučních algoritmů,
- zaměřit se na analýzu citlivosti hodnot optimalizačních kritérií ve vztahu ke změnám vstupních parametrů optimalizačních výpočtů,
- zkoumat různé modely chování cestujících a metody jejich verifikace,
- zabývat se problematikou odhadu prvků v OD maticích a souvisejícími problémy jako například Trip Generation, Trip Distribution, Traffic Assignment, Modal Split,
- řešení problému maximální možné implementace výsledků získaných z modelů pro praktické využití ze strany pracovníků sestavujících jízdní řády, plánujících oběhy vozidel, apod.

## 10. ZÁVĚR

Předložená disertační práce se zabývá optimalizací sítě linek městské hromadné dopravy.

V rámci vypracování disertační práce byly schváleny dva stěžejní cíle. Prvním z cílů bylo modifikovat vybrané existující přístupy do tvarů, které by umožnily akceptaci požadavků vyplývajících z hodnot kritérií stanovených jak z pohledu dopravce, tak i cestujícího. Druhým z cílů bylo na konkrétním příkladu linkové sítě ověřit navržený přístup k tvorbě linkové sítě, vyhodnotit jeho výsledky a praktickou použitelnost.

Disertační práce obsahuje multikriteriální matematický model a nově navržený heuristický algoritmus, který byl aplikován na síť linek v krajském městě Žilina, čímž byla prokázána nejen funkčnost modelů, ale také jejich praktická použitelnost. Řešení navržených modelů probíhalo v optimalizačním softwaru Xpress-IVE. V práci navržený přístup zohledňuje při řešení jak hledisko hospodárnosti, které je preferováno dopravcem, tak i hledisko kvality nabízené služby, které vyžadují cestující.

Přínosy práce lze spatřovat především v tom, že sestavené matematické modely jsou multikriteriální, protože problematiku návrhu sítě linek městské hromadné dopravy je možno za jednokriteriální problém považovat zřídka. Výhodou je i to, že modely jsou lineární, což umožňuje poměrně snadnou řešitelnost i pro praktický rozsah úloh, což bylo v práci také prokázáno. Významnou výhodou navrženého modelu je také skutečnost, že modely jsou sestaveny pro podmínky dopravce, který vlastní heterogenní vozidlový park nejen z hlediska různých typů vozidel, ale také více druhů dopravních prostředků. Postup řešení uvedený v disertační práci je kombinací exaktního algoritmu pro řešení matematického modelu a heuristické metody, přičemž cílem bylo také přizpůsobit výsledky modelu očekávanému chování cestujících.

Navržené modely i algoritmus byly publikovány na několika domácích i mezinárodních konferencích.



## 11. SEZNAM POUŽITÉ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

- [1] Biondi, F., Papola, N., Pavese, O. *Metodi per la progettazione di reti di trasporto collettivo urbano*. Ingegneria Ferroviaria 1978, s. 884 – 893.
- [2] Branická, M., Stacho, M.. *Model MHD a optimalizácia času premiestnenia cestujúceho*. Doprava a spoje [online]. 2007, č. 1, s. 1 - 11. Dostupné z <<http://fpedas.utc.sk/dopravaaspoje/2007/1/branicka.pdf>>. ISSN 1336-7676.
- [3] Borndörfer, R., Grötschel, M., Pfetsch, M. E. *A Column-Generation Approach to Line Planning in Public Transport*. Transportation Science. 2007, Vol. 41, No. 1, pp. 123– 132.
- [4] Ceder, A., Wilson, N. H. M. *Bus Network Design*. Transp. Research Part 20 B 1986, pp. 331-344.
- [5] Constantin, I., Florian, M. *Optimizing Frequencies in a Transit Network: a Nonlinear Bi-level Programming Approach*. International Transactions in Operational Research. 1995, Vol. 2, No. 2, pp. 149-164.
- [6] Černá, A. *Koordinácia liniek a spojov MHD pomocou počítača*. Kandidátska disertačná práca VŠDS Žilina, 1987.
- [7] Černá, A.; Černý, J. *Linear Optimization of Urban Bus Routes and Frequencies, Czechoslovak Journal for Operation Research*. 1993, No. 3, pp. 207 - 217.
- [8] Černá, A.; Černý, J. *Lineárny optimalizačný model pre linky MHD a ich frekvencia*. Horizonty dopravy. 1990, č. 1, s. 33 - 40.
- [9] Černá, A.; Černý, J. *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech*. Praha: Institut Jana Pernera, 2004. 1. vydání, s. 150. ISBN 80-86530-15-9.
- [10] Černý, M., Glückaufová, J. *Vícekritériální vyhodnocování v praxi*. Praha: SNTL, 1982. 1. vydání, s. 138. ISBN nemá.
- [11] Černý J., Kluvánek, P. *Základy matematickej teórie dopravy*, Veda, Bratislava, 1991, 1. vydání, s. 280. ISBN 80 – 224 – 0099 – 8.
- [12] Černý, J. *Poznámka k jednotným intervalom v MHD*. Zborník prác VÚD č. 39, 1983, s. 157 – 175.
- [13] Daněk, J., Plevný, M., Teichmann, D. *The Rational of the Urban Transport Line Network by Minimisation of the Needed Vehicles*. Economics and Management. 2010, Vol. 13, No. 2.
- [14] Dragnev, Ch., Božkov, V. *Metody optimal'nych projektov sistemy linij gorodskogo transporta*. Materiál IKTP Sofia pre 2-strannú spoluprácu s VÚD Žilina, 1988.
- [15] Dubois, D., Bel, G., Llibre, M. *A Set of Methods in Transportation Network Synthesis and Analysis*. Journal of the Operational Research Society. 1979, Vol. 30, Issue 9, pp. 797 - 808.

- [16] Eisler, J. *Úvod do ekonomiky dopravy*, Codex Bohemia, 1998, 1. vydání, s. 281. ISBN 80 – 85963 – 54 – X.
- [17] Erlander, S., Schéele, S. *A Mathematical Programming Model for Bus Traffic in a Network*. Sb. Transportation and Traffic Theory. Sydney, REED, 1974, pp. 581-605.
- [18] Fan, W., Machemehl, R. B. *Optimal Transit Route Network Design Problem: Algorithms, Implementations, and Numerical Results*. 2004, pp. 267. Research Report SWUTC/04/167244-1.
- [19] Fiala, P. *Modely a metody rozhodování*. Oeconomica, Praha, 2006, 1. vydání, s. 292. ISBN 80-245-0622-X.
- [20] Filippi, F., Gori, S., Pagliari, E. *Progetto di una rete di trasporto pubblico urbano*. CNR PFT 5, Convegno Nazionale (sborník), Napoli, 1988.
- [21] Hasselstrom, D. *Public transportation planning – mathematical programming approach*. Dept. of Buss. Administration. U. of Gotthenburg, Sweden, 1981.
- [22] Chlebníčan, P. et al. *Optimalizacia autobusovej MHD v meste Poprad*. Správa o riešení úlohy, CHAPS, Softwarové stredisko pre dopravné projektovanie, Žilina 1990.
- [23] Janáček, J. *Modelování komunikačních systémů I*. Praha, NADAS, 1990. 1. vydání, s. 152. ISBN 80-7100-028-0.
- [24] Janáček, J. *Řešení úloh matematického programování na osobních počítačích*. Žilina: VŠDS v Žilině, 1993. 1. vydání, s. 147. ISBN 80-7100-116-3.
- [25] Lampkin, W., Saalmans, P. D. *The Design of Routes, Service Frequencies and Schedules for a Municipal Bus Undertaking: A Case Study*. Operational Research Quarterly. 1967, Vol. 18, No. 4, pp. 375-397.
- [26] Majer, T. *Simulačný model zaťaženia spojov MHD*. Zborník príspevkov k 6. medzinárodnej konferencii. Dopravná infraštruktúra v mestách, Žilina, 22. - 23. 10. 2008.
- [27] Palúch, S., Majer, T. *K optimalizácii mestskej a prímestskej pravidelnej osobnej dopravy*. Sborník k III. mezinárodní konferenci 2007. „Vysoká škola jako facilitátor rozvoje společnosti a regionu“. Kunovice, 26. ledna, 2007, s. 245 – 248. ISBN 80-7314-107-8.
- [28] Peško, Š. *Podpora metód operačného výskumu pri navrhovaní systému liniek*. CD sborník. 6. mezinárodní konference Dopravná infraštruktúra v mestách. Žilina, 22. - 23. 10. 2008.
- [29] Plašil, J., Chlebníčan, P. *Úloha určenia optimálneho priestorového planu v systéme s odovzdávaním náležitostí*. Práce a štúdie VŠDS v Žilině č. 7, 1989, s. 59 – 71.
- [30] Rychetník, Z., Zelinka, J., Pelzbauerová, V. *Sbírka příkladů z lineárního programování*. Praha, SNTL, 1. vydání, 1968, s. 314.

- [31] Salter, R. S. *Highway Traffic Analysis and Desing Nac Midlan*, London, 1974.
- [32] Seveborg, J. O., Trollhagen, U. *Analys av buslinjenät i Karlstad*. Nordisk Planerings-konsult, Göteborg, 1982 (švédsky).
- [33] Shih, M. C., Mahmassani, H. S. *A Vehicle Sizing Model for Bus Transit Systems*. Transportation Research Record, 1452, pp. 35-41, 1994.
- [34] Surovec, P. *Provoz a ekonomika silniční dopravy I*. Ostrava, 2000, 1. vydání, s. 122. ISBN 80-7078-735-X.
- [35] Surovec, P. *Tvorba systému mestskej hromadnej dopravy*. Žilina, 1999, 1. vydání, s. 149. ISBN 80-7100-586-X.
- [36] Surovec, P. a kol. *Ekonomické a kvalitatívne hodnotenie dopravy*. Výskumná úloha, grant č. 1/4326/97. Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta PEDAS, 1997.
- [37] Teichmann, D. *O niekoľko modifikáciach matematického modelu pridělování vozidel linkám v městské hromadné dopravě*. Nová železniční technika. 2009, č. 1, s. 20-23.
- [38] Tiong An Chua. *The Planning of Urban Bus Routes and Frequencies: a Survey*. Transportation 12, 1984, s. 147 – 172.
- [39] Van Nes, R., Hamerslag, R., Immers, B. H. *Design of Public Transport Networks*. TV Delft Report, January 1988, Delft, Holland.
- [40] MEFA v.06 software pro výpočet emisí z dopravy, bezplatně dostupný z <<http://www.env.cz>>.
- [41] Optimalizační software Xpress – IVE, bezplatně dostupný z <<http://www.dashoptimization.com>>.
- [42] Dopravný podnik mesta Žiliny [online]. 2010 [cit 2010-05-11] dostupné z: <<http://www.dpmz.sk>>.
- [43] MHD Žilina [online]. 2010 [cit 2010-04-10] dostupné z: <<http://www.imhd.zoznam.sk/za/index.php?w=f230212d372f2833ef393021deam=272e30ee39f1f21f9f0f0f2ef342252933>>.
- [44] *Výročná správa DPMŽ, s. r. o za rok 2009* [online]. 2011 [cit 2011-10-1] dostupné z: <[http://www.dpmz.sk/dokumenty/1283255702\\_1.pdf](http://www.dpmz.sk/dokumenty/1283255702_1.pdf)>.
- [45] Jánošíková, Ľ. *Modelovanie diskretného výberupri návrhu liniek mestskej hromadnej dopravy (Discrete Choice Modelling)*. Príspevek na seminári doktorandů. Žilina, 2010.
- [46] Peško, Š., Smieško J.. *Stochastické modely operačnej analýzy, ŽU v Žiline*, 1999, 242 s., ISBN 80-7100-570-3

## 12. PŘEHLED PUBLIKACÍ DOKTORANDA

### Seznam vlastních článků publikovaných k tématu disertační práce

- [47] Blatoň, M. *The Mathematical Model of Assigning Vehicles to Transport Lines Modification*. Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava. Ostrava, 2009. ISSN 1210-0471.
- [48] Blatoň, M. *Lineární matematický model minimalizující náklady na provoz vozidel*. Zdvihací zařízení v teorii a praxi. 2009, č. 1. ISSN 1802-2812.
- [49] Blatoň, M. *Vícekriteriální optimalizace linek MHD*. Sborník příspěvků. Úlohy diskrétní optimalizace v dopravní síti. Pardubice, 2009. ISBN 978-80-7395-193-1.
- [50] Jánošíková, Ľ., Blatoň M., Teichmann, D. *Design of urban public transport lines as a multiple criteria optimisation problem*. In Urban Transport XVI, sborník příspěvků. WIT Press, Southampton, Boston, 2010. ISBN 978-1-84564-456-7.
- [51] Jánošíková, Ľ., Blatoň M., Teichmann, D., Koháni, M. *Modelovanie správania cestujúcich pri návrhu liniek mestskej hromadnej dopravy*. Sborník příspěvků. Úlohy diskrétní optimalizace v dopravní síti. Pardubice, 2010. ISBN 978-80-7395-193-1.
- [52] Jánošíková Ľ., Koháni M., Blatoň M., Teichmann D. *Optimisation of the urban line network using a mathematical programming approach*. Odborný časopis International Journal of Sustainable Development and Plainning. 2011, „v tisku“.
- [53] Blatoň, M. *Komparace vybraných metod zabývajících se návrhem sítě linek MHD*. Elektronický odborný časopis Perner's Contacts. 2009, ročník 4, č. 3. ISSN 1801-674X.
- [54] Blatoň, M., Teichmann, D. *Vybrané metody návrhu sítě linek MHD používané v zahraničí*. Elektronický odborný časopis Perner's Contacts. 2009, ročník 4, č. 4. ISSN 1801-674X.

### Seznam ostatních publikačních aktivit

- [55] Blatoň, M., Křivda, V. *Sledování konfliktních situací z plovoucího vozidla*. Elektronický odborný časopis Perner's Contacts. 2007, č. 2. ISSN 1801-674X.
- [56] Blatoň, M., Křivda, V. *Posouzení vlivu zprovoznění dálnice D 47*. Elektronický odborný časopis Perner's Contacts. 2008, č. 2. ISSN 1801-674X.

# Přílohy

## SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha 1** Nejvyšší hodnoty intenzit cesujících na úsecích v jednotlivých časových obdobích

**Příloha 2** OD matice přepravních vztahů (seznam zastávek uveden níže, hodnoty OD přepravních matic pro všechna časová období jsou pouze v elektronické podobě)

**Příloha č. 1** Nejvyšší hodnoty intenzit cestujících na úsecích v jednotlivých časových obdobích

- ranní přepravní špičky 6 – 8 h
- ranního přepravního sedla 8 – 14 h
- odpolední přepravní špičky 14 – 17 h
- víkendového dne 4 – 23 h

<b>Nejvyšší hodnoty intenzit cestujících na úsecích v ranní přepravní špičce pracovního dne 6 - 8 h</b>			
<b>P.č.</b>	<b>Výchozí zastávka</b>	<b>Cílová zastávka</b>	<b>Intenzita cestujících za dané časové období</b>
1	Polná	Železničná stanica	130
2	Železničná stanica	Bytčica	122
3	Železničná stanica	Žilinská univerzita	110
4	Železničná stanica	Fatranská	86
5	Matice slovenskej	Polícia	77
6	Matice slovenskej	Hurbanova	73
7	Zádubnie	Hurbanova	70
8	Smreková	Polícia	70
9	Železničná stanica	Rudnayova	66
10	Stodolova	Polícia	65

<b>Nejvyšší hodnoty intenzit cestujících na úsecích v ranním přepravním sedle pracovního dne 8 - 14 h</b>			
<b>P.č.</b>	<b>Výchozí zastávka</b>	<b>Cílová zastávka</b>	<b>Intenzita cestujících za dané časové období</b>
1	Železničná stanica	Žilinská univerzita	209
2	Žilinská univerzita	Železničná stanica	115
3	Matice slovenskej	Hurbanova	112
4	Železničná stanica	Fatranská	106
5	Sv. Cyrila a Metoda	Hurbanova	103
6	Železničná stanica	Brodno	103
7	Železničná stanica	Stodolova	92
8	Hlinská	Žilinská univerzita	89
9	Matice slovenskej	Polícia	78
10	Hurbanova	Matice slovenskej	78

Nejvyšší hodnoty intenzit cestujících na úsecích v odpolední přepravní špičce pracovního dne 14 - 17 h			
P.č.	Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Intenzita cestujících za dané časové období
1	Hurbanova	Matice slovenskej	106
2	Železničná stanica	Stodolova	105
3	Polná	Železničná stanica	100
4	Železničná stanica	Brodno	98
5	Hurbanova	Stodolova	83
6	Železničná stanica	Matice slovenskej	82
7	Žilinská univerzita	Železničná stanica	79
8	Žilinská univerzita	Stodolova	78
9	Hurbanova	Zádubnie	77
10	Polícia	Matice slovenskej	73

Nejvyšší hodnoty intenzit cestujících na úsecích v období víkendového dne 4 - 23 h			
P.č.	Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Intenzita cestujících za dané časové období
1	Železničná stanica	Matice slovenskej	172
2	Železničná stanica	Stodolova	144
3	Železničná stanica	Limbová	106
4	Limbová	Matice slovenskej	104
5	Hurbanova	Matice slovenskej	102
6	Matice slovenskej	Hurbanova	96
7	Železničná stanica	Brodno	95
8	Železničná stanica	Smrekova	95
9	Železničná stanica	Slnčné námestie	92
10	Matice slovenskej	Limbová	92



**Příloha č. 2 – část 1** OD matice přepravních vztahů – seznam a číslování zastávek v OD matici.

1	Mojšová Lúčka	42	POD VINICOU
2	Trnové	43	POLÍCIA
3	Rosinky spolu	44	POLNÁ
4	Bytčica	45	POŠTOVÁ
5	Kamenná	46	PREDMESTSKÁ
6	Bánová	47	PRI CELULÓZKE
7	Žilinská Lehota	48	PRIEHRADNÁ
8	Považský Chlmec	49	PRIEMYSELNÁ
9	Vranie	50	PRI KYSUCI
10	Brodno	51	RAJECKÁ, ELV
11	Zástranie	52	RAJECKÁ, MLIEK.
12	Zádubnie	53	RAJECKÁ, STAVOMO
13	BRATISLAVSKÁ	54	RÁZUSOVA
14	CENTRÁLNA	55	ROSINKY
15	CESTÁRSKA	56	ROSINSKÁ, PLEMENARNY P.
16	CINTORÍNSKA	57	ROSINSKÁ, VÚVT
17	DOLNÁ	58	RUDNAYOVA
18	FATRANSKÁ	59	SALEZIÁNSKA
19	FURDEKOVA	60	SLNEČNÉ NÁMESTIE
20	HÁLKOVA	61	SMREKOVÁ
21	HLINSKÁ	62	SPANYOLOVA, NEMOCNICA
22	HOLLÉHO	63	STODOLOVA
23	HŮRECKÁ	64	SV. CYRILA A METODA
24	HRIČOVSKÁ	65	ŠTEFÁNIKOVO NÁMESTIE
25	HURBANOVÁ	66	ŠTÚROVO NÁMESTIE
26	HVIEZDOSLAVOVA	67	TAJOVSKÉHO
27	JASEŇOVÁ	68	TULIPÁNOVÁ
28	KOMENSKÉHO	69	VEĽKÁ OKRUŽNÁ
29	Košická, Tesco H	70	ŽILINSKÁ UNIVERZITA
30	KRAGUJEVSKÁ	71	VYSOKOŠKOLÁKOV
31	KVAČALOVA	72	ZÁVODSKÁ
32	KYSUCKÁ	73	ZÁVODSKÉHO
33	LIMBOVÁ	74	ŽITNÁ
34	MATEJA BELA	75	ŽELEZNIČNÁ STANICA
35	MOSTNÁ	76	ZVOLENSKA
36	MATICE SLOVENSKEJ	77	Na Horevaží, Tes
37	NA LÁNY	78	Pod Hájom
38	NÁMESTIE HRDINOV	79	Bernoľáková
39	OBCHODNÁ		
40	OCELIARSKA		
41	PIETNA		

**Příloha č. 2** – hodnoty jednotlivých prvků v OD maticích jsou uvedeny v elektronické podobě na přiloženém CD.